

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ**

CHRISTIAN SCAPULATEMPO STROBEL

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO USO DE  
CHAMINÉS SOLARES NO BRASIL**

CURITIBA  
Agosto 2012

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ**

**CHRISTIAN SCAPULATEMPO STROBEL**

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO USO DE  
CHAMINÉS SOLARES NO BRASIL**

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luís Mauro Moura  
Co-Orientadora: Prof. Dra. Viviana Cocco Mariani

CURITIBA  
Agosto 2012

Dados da Catalogação na Publicação  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná  
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR  
Biblioteca Central

S919a 2012	<p>Strobel, Christian Scapulatempo</p> <p>Análise do potencial energético do uso de chaminés solares no Brasil. / Christian Scapulatempo Strobel ; orientador, Luis Mauro Moura ; co-orientadora, Viviana Cocco Mariani. – 2012. 184 f. : il. ; 30 cm</p> <p>Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2012. Bibliografia: f. 150-158</p> <p>1. Engenharia mecânica. 2. Chaminés. 3. Energia termossolar. 4. Energia solar. I. Moura, Luis Mauro. II. Mariani, Viviana Cocco. III. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.</p> <p>CDD 20. ed. – 620.1</p>
---------------	--

# TERMO DE APROVAÇÃO

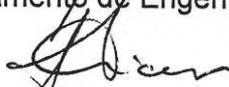
**Christian Scapulatempo Strobel**

## **Análise do Potencial Energético do Uso de Chaminés Solares no Brasil**

Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de doutor no Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



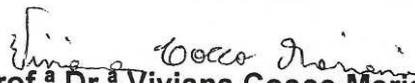
**Prof. Dr. Ramon Molina Valle**  
Departamento de Engenharia Mecânica, (UFMG)



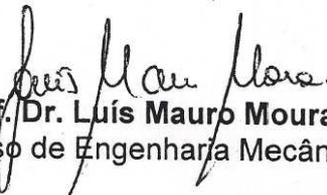
**Prof. Dr. Paulo Smith Schneider**  
Departamento de Engenharia Mecânica, (UFRGS)



**Prof. Dr. Nathan Mendes**  
Curso de Engenharia Mecânica, (PUCPR)



**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Viviana Cocco Mariani**  
Curso de Engenharia Mecânica, (PUCPR)



Presidente: **Prof. Dr. Luis Mauro Moura**  
Curso de Engenharia Mecânica, (PUCPR)

Curitiba, 10 de agosto de 2012.



*“O que mais me surpreende na  
humanidade são os homens...  
Porque perdem a saúde para juntar dinheiro,  
depois perdem dinheiro para recuperar a saúde.  
E por pensarem ansiosamente no futuro,  
esquecem do presente de tal forma que  
acabam por não viver nem o presente nem o futuro.  
E vivem como se nunca fossem morrer...  
... e morrem como se nunca tivessem vivido”.*

**Dalai Lama**

*Dedico este trabalho à minha esposa, Patricia, e a  
meus queridos filhos, Lucca e Julia.*

## **Agradecimentos**

Como já disse Isaac Newton: *“Se me foi possível enxergar longe, foi porque estava apoiado sobre ombros de gigantes”*.

Desta forma, agradeço ao professor Luís Mauro e à professora Viviana Mariani, pela orientação de meu trabalho.

À Patricia, minha esposa, por nossa vida juntos, e pela compreensão nos vários momentos de ausência e nas madrugadas sem fim.

Aos meus filhos, Lucca e Julia, por encherem minha vida de alegria e felicidade.

Ao Dr. Weinrebe, por gentilmente me fornecer dados de operação de uma chaminé solar piloto de Manzanares, Espanha.

Ao Dr. Marco Aurélio dos Santos Bernardes, por gentilmente me ajudar com seu modelo durante minha pesquisa.

Aos familiares e amigos.

A Deus.

## RESUMO

O mundo ao nosso redor é repleto de energia proveniente de fontes limpas. Assim, utilizar eficientemente esta energia que está ao nosso redor é um dos desafios da área de engenharia. Dentre as energias naturais, em especial a energia solar, um novo conceito para o aproveitamento de energia está ganhando espaço: as chaminés solares. Uma chaminé solar é um gerador eólico solar, pois consiste em um coletor solar com grande diâmetro colocado a poucos metros do solo, feito de material vítreo para manter o calor. Na parte central deste coletor é inserida uma chaminé para transportar esta massa de ar aquecida até uma região de menor pressão atmosférica, garantindo uma força de empuxo maior. A turbina pode ser inserida na base da chaminé, na vertical, ou então várias turbinas podem ser dispostas radialmente próximas da chaminé.

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um modelo matemático para validar os dados experimentais obtidos em Manzanares, na Espanha, além de obter dados que justifiquem ou não a implantação de uma usina que opere pelo princípio de uma chaminé solar em território brasileiro, tendo como base a energia gerada pela chaminé solar, o pico de potência diário e a energia gerada por uma geração combinada por meio de módulos fotovoltaicos. Estes parâmetros são apresentados na forma de campo de isolinhas com o potencial de geração de energia elétrica para cada região do país.

A metodologia consiste na pesquisa da incidência de radiação solar em solo brasileiro, estudo da influência da geometria da chaminé na eficiência, geração combinada com células fotovoltaicas, estudo dos materiais utilizados na construção da planta, proposta de um novo modelo matemático e numérico bem como a simulação através do modelo numérico escolhido para estudo de geração de energia.

Com base no modelo matemático e numérico, foi confeccionado um programa computacional em C++, o mesmo foi validado com base nos dados da usina piloto de Manzanares, obtendo-se um erro de 1,2%, considerado satisfatório.

Os resultados revelam graficamente a influência do diâmetro do coletor, altura da chaminé, qualidade do material vítreo e o posicionamento dos módulos fotovoltaicos na geração de energia, assim como expressam numericamente e graficamente o potencial energético deste tipo de tecnologia para o Brasil. Sabe-se que a utilização de energias renováveis será uma obrigação para garantir a sustentabilidade do planeta. Neste trabalho, procura-se otimizar o rendimento da chaminé solar para viabilizar economicamente o empreendimento, embora se saiba que o uso de energias renováveis, de modo geral, apresenta custos relativamente altos de implementação.

**Palavras-chave:** Chaminé solar; Energias renováveis; Energia termossolar.

## ABSTRACT

The world around us is full of energy from natural sources. Efficient use of natural energy that surrounds us is a challenge for the engineering. Among the natural energies, especially solar energy, a new concept of energy conversion is in debate: the solar chimneys. A solar chimney is a solar wind generator, as it uses a solar collector of large diameter placed a few meters from the ground, made of glass, to heat the air. In the central part of this collector, a chimney is inserted to carry the heated mass of air for a lower pressure region, ensuring a greater buoyant force. The turbo-generator assembly can be inserted at the base of the chimney in the vertical position, or several assemblies arranged radially near the chimney.

The main objective of this work is to present an accurate mathematical model compared to experimental data of Manzanares, Spain, and study the technical feasibility of this technology in Brazil, based on energy generated by the solar chimney, the daily peak power and energy generated by a combined generation process with photovoltaic modules. These parameters are presented in form of a colored contour map with the potential for electricity generation for each region of the country.

The work methodology consists in research of solar radiation in Brazil, studies of the influence of geometry of the solar chimney on energy generated, combined generation of electricity with photovoltaic cells, study of materials used on plant, as well as an improved mathematical and numerical model and energy generation simulation using a computational program.

Based on mathematical and numerical model, a C++ algorithm was written and validated based on data from Manzanares pilot plant. A divergence of 1.2% was found, which is considered satisfactory.

The results show the influence of the collector diameter, chimney height, quality of the glass material and the arrangement of photovoltaic on power generation, as well as numerically and graphically express the energy potential of this technology in Brazil. It can be concluded that the use of renewable energy will be an obligation to ensure the sustainability of the planet. The aim is to enhance the performance of solar chimney so this kind of project becomes economically viable, although it is known that the use of renewable energy in general has relatively high costs of implementation.

**Keywords:** Solar chimney; Renewable energies; Solar thermal energy.

**Conteúdo**

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA .....	14
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA .....	19
1.3	JUSTIFICATIVA TEÓRICA E PRÁTICA .....	20
1.4	ESTRUTURA DESTE DOCUMENTO .....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>23</b>
2.1	HISTÓRIA .....	23
2.2	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E GEOMÉTRICAS .....	26
2.3	ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA .....	31
2.4	MODELOS MATEMÁTICOS E NUMÉRICOS .....	37
2.5	MODELOS EXPERIMENTAIS .....	44
2.6	MODELOS INOVADORES .....	46
2.7	CONCLUSÕES PARCIAIS .....	55
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>57</b>
3.1	MODELAGEM DO AR NO INTERIOR DO COLETOR .....	58
3.1.1	Balanco de massa de ar no coletor .....	60
3.1.2	Conservação da quantidade de movimento no coletor .....	60
3.1.3	Balanco de energia no coletor .....	62
3.1.4	Modelo térmico da transferência de calor no coletor .....	64
3.1.5	Hipótese de escoamento .....	67
3.1.6	Parâmetros ópticos .....	68
3.1.7	Coefficientes de convecção e radiação .....	72
3.2	EQUAÇÕES GOVERNANTES NA CHAMINÉ .....	75
3.2.1	Modelo de Koonsrisuk <i>et al.</i> (2010) .....	82
3.3	CÉLULAS FOTOVOLTAICAS .....	85
3.3.1	Posicionamento .....	85
3.3.2	Estimativa de eficiência e potência .....	87
3.4	CONCLUSÕES PARCIAIS .....	90
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>91</b>
4.1	DOMÍNIO FÍSICO .....	92
4.2	ALGORITMO DE SOLUÇÃO .....	93
4.3	MODELOS PARA AVALIAR ENERGIA EM CHAMINÉS SOLARES .....	98
4.4	VALIDAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL .....	99
4.4.1	Dados da planta piloto de Manzanares .....	99
4.5	ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS .....	104

4.6	CONCLUSÕES PARCIAIS .....	109
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>111</b>
5.1	INCIDÊNCIA DE RADIAÇÃO SOLAR EM TERRITÓRIO BRASILEIRO.....	111
5.2	ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DO MODELO .....	114
5.3	ANÁLISES NO TERRITÓRIO BRASILEIRO PARA O INVERNO .....	115
5.3.1	Análise da energia gerada .....	115
5.3.2	Análise do pico de potência gerado.....	116
5.3.3	Análise da energia fotovoltaica gerada .....	117
5.3.4	Resumo dos resultados para o inverno.....	118
5.3.5	Influência dos parâmetros geométricos – Energia gerada .....	119
5.3.6	Influência dos parâmetros geométricos – Pico de potência .....	121
5.3.7	Influência dos parâmetros geométricos – Energia fotovoltaica gerada.....	122
5.4	ANÁLISES NO TERRITÓRIO BRASILEIRO PARA O VERÃO.....	123
5.4.1	Análise da energia diária gerada .....	123
5.4.2	Análise do pico de potência gerado.....	124
5.4.3	Análise da energia fotovoltaica gerada .....	125
5.4.4	Resumo dos resultados para o verão.....	126
5.4.5	Influência dos parâmetros geométricos – Energia gerada .....	128
5.4.6	Influência dos parâmetros geométricos – Pico de potência .....	129
5.4.7	Influência dos parâmetros geométricos – Energia fotovoltaica gerada.....	131
5.5	ANÁLISES NO TERRITÓRIO BRASILEIRO – MÉDIA ANUAL .....	132
5.5.1	Análise da energia diária gerada .....	132
5.5.2	Análise do pico de potência gerada .....	133
5.5.3	Análise da energia fotovoltaica gerada .....	134
5.5.4	Resumo dos resultados – média anual .....	135
5.6	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	136
5.6.1	Análise de sensibilidade do material da cobertura.....	136
5.6.2	Análise da influência da localização dos módulos fotovoltaicos .....	141
5.7	CONCLUSÕES PARCIAIS .....	142
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>147</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>150</b>
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO BIDIMENSIONAL PARA O INVERNO .....</b>	<b>159</b>
	<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO BIDIMENSIONAL PARA O VERÃO.....</b>	<b>165</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>171</b>
	ANEXO I: TABELAS DE RADIAÇÃO SOLAR.....	171
	ANEXO II: RESULTADOS DO MODELO PROTÓTIPO DE MANZANARES .....	182

**Lista de Figuras**

Figura 1.1: Variação de Temperatura, poeira e CO <sub>2</sub> nos últimos milhares de anos.....	2
Figura 1.2: Relação entre consumo energético e emissão de dióxido de carbono. ....	3
Figura 1.3: Esquema de uma usina hidrelétrica. ....	5
Figura 1.4: Ilustração de uma usina de energia das marés. ....	6
Figura 1.5: Ilustração de uma usina de energia das ondas tipo “terminador” .....	6
Figura 1.6: Usina de energia das ondas tipo “absorvedor pontual”.....	7
Figura 1.7: Esquema de uma usina geotérmica .....	8
Figura 1.8: Mapa eólico do Brasil .....	9
Figura 1.9: (a) Montagem das pás de um gerador. (b) Fazenda ou parque eólico .....	10
Figura 1.10: Perfil de potência (W) x velocidade do vento (m/s) para uma turbina eólica.....	10
Figura 1.11: Ilustração de uma usina fotovoltaica .....	11
Figura 1.12: Ilustração de uma usina termossolar no Arizona, EUA .....	12
Figura 1.13: Ilustração de uma usina termossolar em Sevilha, Espanha.....	12
Figura 1.14: Potencial energético mundial para energias renováveis (TWh/ano) .....	13
Figura 1.15: Esquema de funcionamento de uma chaminé solar. ....	14
Figura 1.16: Poder emissivo espectral de corpos negros .....	15
Figura 1.17: Transmissão versus comprimento de onda para o vidro comum .....	16
Figura 1.18: Transmissão versus comprimento de onda para o policarbonato.....	16
Figura 1.19: Chaminé solar em Manzanares, Espanha. ....	17
Figura 1.20: Montanha Solar. ....	18
Figura 2.1: Projeto de motor solar proposto por Isidoro Cabanyes .....	23
Figura 2.2: Chaminé solar proposta por Dubos (a) Esquema (b) Representação futurista .....	24
Figura 2.3: Experimento proposto por Dubos .....	25
Figura 2.4: Variação de temperatura e Potência versus fator de queda de pressão na turbina .....	26
Figura 2.5: Relação entre o fator de queda de pressão na turbina e a velocidade de entrada;.....	28
Figura 2.6: Relação entre o fator de queda de pressão na turbina e a razão entre a perda por convecção ( $\alpha$ ) e absorção do solo ( $\beta$ ). ....	29
Figura 2.7: Relação entre altura máxima e pressão atmosférica .....	30
Figura 2.8: Relação entre potência gerada e a altura da chaminé .....	30
Figura 2.9: Relação entre potência, altura e fator de temperatura entre coletor e turbina .....	32

Figura 2.10: Relação entre a irradiação solar, acréscimo de temperatura do ar no coletor e velocidade do ar na turbina, em 30 de outubro de 2005 em Botswana. ....	33
Figura 2.11: Chaminé solar para desidratação de alimento. ....	34
Figura 2.12: Curva de desidratação de tomates utilizando apenas a luz solar e a chaminé solar. ....	34
Figura 2.13: Média diária da potência elétrica gerada. ....	35
Figura 2.14: Simulação da potência gerada durante um ano. ....	35
Figura 2.15: Divisão dos custos de implantação de uma chaminé solar na Europa. ....	36
Figura 2.16: Efeito das correlações de convecção na potência gerada em simulações. ....	39
Figura 2.17: Efeito da qualidade do material da cobertura na potência gerada. ....	39
Figura 2.18: Efeito do material absorvedor no solo na potência gerada. ....	40
Figura 2.19: Diferentes posicionamentos das turbinas: (a) única turbina na vertical, (b) múltiplas turbinas na vertical e (c) múltiplas turbinas na horizontal. ....	42
Figura 2.20: Potência gerada pela variação de diferentes parâmetros. ....	43
Figura 2.21: Transmissividade de diferentes materiais plásticos em função do ângulo zênite. ....	45
Figura 2.22: Protótipo experimental em escala reduzida construído na China. ....	46
Figura 2.23: Planta que opera pelo princípio de Coluna de Vórtex Gravitacional. ....	47
Figura 2.24: Distribuição de pressão ao longo do raio para uma altura de 4000 m. ....	48
Figura 2.25: Distribuição de velocidade em z ao longo do raio para uma altura de 4000 m. ....	48
Figura 2.26: Distribuição de velocidade radial para uma altura de 4000 m. ....	49
Figura 2.27: Torre de energia. ....	50
Figura 2.28: Ciclone solar para remoção de água da atmosfera e geração de energia. ....	51
Figura 2.29: Detalhe do gerador de vórtice no coletor, e do separador na base da chaminé. ....	52
Figura 2.30: Produção de água potável versus altura da chaminé ( $0 < h < 500$ m). ....	53
Figura 2.31: Produção de água potável versus altura da chaminé ( $500 < h < 1000$ m). ....	53
Figura 2.32: Produção de energia elétrica versus altura da chaminé ( $0 < h < 500$ m). ....	54
Figura 2.33: Produção de energia elétrica versus altura da chaminé ( $500 < h < 1000$ m). ....	54
Figura 3.1: Modelo A proposto para a geração de energia elétrica. ....	57
Figura 3.2: Modelo B proposto para a geração combinada com módulos fotovoltaicos. ....	58
Figura 3.3: Representação do modelo da planta. ....	59
Figura 3.4: Balanço de energia em um elemento infinitesimal do coletor. ....	63
Figura 3.5: Fluxo de energia no sistema coletor x solo e circuito térmico equivalente. ....	65

Figura 3.6: Escoamento interno entre placas planas paralelas .....	67
Figura 3.7: escoamento externo sobre uma placa plana .....	68
Figura 3.8: Múltiplas reflexões em um material semitransparente. ....	69
Figura 3.9: Múltiplas reflexões entre o solo e o coletor.....	70
Figura 3.10: Efeito do uso de simplificações nas propriedades ópticas da interface vidro-solo .....	71
Figura 3.11: (a) Componentes de uma célula fotovoltaica e (b) célula comercial.....	85
Figura 3.12: Detalhe do posicionamento dos módulos fotovoltaicos em relação ao coletor .....	86
Figura 3.13: Efeito da temperatura na corrente e tensão geradas por um módulo fotovoltaico.....	87
Figura 3.14: Fluxo de energia (coletor e célula fotovoltaica) e circuito térmico equivalente.....	88
Figura 4.1: (a) Domínio físico/condições de contorno e (b) Detalhe de um elemento. ....	93
Figura 4.2: Fluxograma do procedimento computacional adotado. ....	97
Figura 4.3: Velocidade do fluxo na chaminé e potência gerada em função da hora do dia.....	101
Figura 4.4: Temperatura ambiente medida em Manzanares - 08 de junho de 1987.....	102
Figura 4.5: Radiação global horizontal medida em Manzanares - 08 de junho de 1987. .....	102
Figura 4.6: Umidade relativa do ar atmosférico medida em Manzanares - 08 de junho de 1987.....	103
Figura 4.7: Velocidade do ar atmosférico medida em Manzanares - 08 de junho de 1987. ....	103
Figura 4.8: Eficiência da turbina medida em Manzanares - 08 de junho de 1987. ....	104
Figura 4.9: Simulação da potência gerada para cada modelo. ....	105
Figura 4.10: Simulação da potência gerada usando o modelo de Koonsrisuk <i>et al.</i> (2010), original e modificado. ....	106
Figura 4.11: Simulação da potência gerada usando o modelo de Bernardes <i>et al.</i> (2010), original e modificado. ....	107
Figura 4.12: Perfis de acréscimo de temperatura obtida para cada modelo.....	108
Figura 4.13: Perfis de velocidade máxima na chaminé obtida para cada modelo. ....	109
Figura 5.1: Mapa de isolinhas para a radiação solar global diária, média anual em $\text{MJ/m}^2$ .....	113
Figura 5.2: Análise de convergência – Influência do número de elementos na simulação.....	114
Figura 5.3: Distribuição do potencial de energia diária gerada - inverno.....	115
Figura 5.4: Distribuição do potencial de pico de potência diária - inverno .....	116

---

Figura 5.5: Distribuição do potencial de energia fotovoltaica diária por un. de área - inverno .....	117
Figura 5.6: Influência da geometria da planta na energia diária gerada (inverno).....	120
Figura 5.7: Influência da geometria da planta no pico de potência (inverno).....	121
Figura 5.8: Influência da geometria da planta na energia fotovoltaica (inverno) .....	122
Figura 5.9: Distribuição do potencial de energia diária gerada - verão.....	124
Figura 5.10: Distribuição do potencial de pico de potência diária - verão .....	125
Figura 5.11: Distribuição do potencial de energia fotovoltaica diária por un. de área - verão .....	126
Figura 5.12: Influência da geometria da planta na energia gerada (Verão) .....	129
Figura 5.13: Influência da geometria da planta no pico de potência (Verão) .....	130
Figura 5.14: Influência da geometria da planta na energia fotovoltaica (Verão) .....	131
Figura 5.15: Distribuição do potencial de energia diária gerada – média anual.....	132
Figura 5.16: Distribuição do potencial de pico de potência diária – média diária.....	133
Figura 5.17: Potencial de energia fotovoltaica diária por unidade de área – média anual .....	134
Figura 5.18: Influência das propriedades ópticas e geométricas do vidro na energia diária gerada pela chaminé solar .....	137
Figura 5.19: Influência das propriedades ópticas e geométricas do vidro no pico de potência gerado pela chaminé solar .....	138
Figura 5.20: Influência das propriedades ópticas e geométricas do vidro na energia diária gerada por unidade de área dos módulos fotovoltaicos. ....	139
Figura 5.21: Influência do coeficiente de extinção .....	140
Figura 5.22: Influência da localização dos módulos na energia gerada .....	142

**Lista de Tabelas**

Tabela 1.1 Potencial energético para energias renováveis, por região, em TWh/ano .....	13
Tabela 1.2 Potencial energético para energias renováveis, por região, em TWh/ano .....	20
Tabela 2.1 Efeitos de componentes e da atmosfera expressos em queda de pressão na turbina .....	27
Tabela 2.2 Efeitos de componentes e da atmosfera expressos em queda de pressão na turbina .....	40
Tabela 4.1 Coeficientes de transferência de calor .....	95
Tabela 4.2 Parâmetros da planta piloto de Manzanares, Schlaich (1983). .....	100
Tabela 4.3 Resultados para a potência diária gerada pelos modelos analisados.....	104
Tabela 5.1 Influência do número de elementos na simulação .....	114
Tabela 5.2 Resumo dos valores obtidos nas análises para o inverno.....	118
Tabela 5.3 Resumo dos valores obtidos nas análises para o verão.....	127
Tabela 5.4 Resumo dos valores obtidos nas análises – média anual .....	135
Tabela 5.5 Características termofísicas e geométricas de vidros comuns “ultra claros” .....	137
Tabela 5.6 Parâmetros de simulação e resultados de sensibilidade óptica .....	139
Tabela 5.7 Influência do uso do vidro como resistência térmica de condução no modelo .....	141
Tabela 5.8 Habitantes beneficiados com usina padrão - inverno .....	143
Tabela 5.9 Habitantes beneficiados com uma usina padrão - verão .....	145
Tabela A.1 Coeficientes obtidos para a equação ajustada para a energia gerada – inverno .....	159
Tabela A.2 Coeficientes obtidos para a equação ajustada para o pico de potência – inverno .....	161
Tabela A.3 Coeficientes obtidos para a equação ajustada para a energia fotovoltaica gerada – inverno .....	163
Tabela B.1 Coeficientes obtidos para a equação ajustada para a energia gerada – verão .....	165
Tabela B.2 Coeficientes obtidos para a equação ajustada para o pico de potência – verão .....	167
Tabela B.3 Coeficientes obtidos para a equação ajustada para a energia fotovoltaica gerada – Verão .....	169
Tabela C.1 Radiação solar global diária (MJ/m <sup>2</sup> ) – Brasil.....	171
Tabela C.2 Radiação solar global diária (MJ/m <sup>2</sup> ) – Países vizinhos .....	180
Tabela D.3 Dados da planta piloto de Manzanares, Espanha (08 de junho de 1987).....	182

**Abreviaturas**

<b>Sigla</b>	<b>Significado</b>
ANSYS CFX	Software comercial de simulação via CFD
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
C++	Código de programação baseado em C orientado a objetos
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CTP	Condições de Teste Padrão
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IPCC	<i>International Panel on Climate Changes</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
NFRC	<i>National Fenestration Rating Council</i>
PVC	Cloreto de Polivinila
MCT	Ministério de Ciências e Tecnologia
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

## Lista de símbolos

Símbolo	Significado	Unidade
$A$	Área	$m^2$
$A_c$	Absorção total do coletor	Adimensional
$A_c$	Área do coletor	$m^2$
$A_{ch}$	Área da chaminé	$m^2$
$A_{módulos}$	Área de cobertura dos módulos fotovoltaicos	$m^2$
$A_{módulos}$	Área coberta por módulos fotovoltaicos	$m^2$
$A_v$	Absorção total do vidro	Adimensional
$b$	Largura	m
$c_p$	Calor específico à pressão constante	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$c_{p,s}$	Calor específico do solo	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$c_w$	Coefficiente de atrito	Adimensional
$D_h$	Diâmetro hidráulico	m
$e$	Rugosidade absoluta	m
$E$	Energia gerada pela chaminé solar, média diária	$MW.h.dia^{-1}$
$E_{fv}$	Energia gerada pelos módulos fotovoltaicos por un. de área, média diária	$kW.h.m^{-2}.dia^{-1}$
$erf(x)$	Função erro de Gauss	Adimensional
$f$	Fator de atrito	Adimensional
$F$	Força	N
$g$	Aceleração da gravidade	$m.s^{-2}$
$G$	Irradiação solar	$W.m^{-2}$
$G_1$	Irradiação solar líquida no coletor	$W.m^{-2}$
$G_2$	Irradiação transmitida para o solo	$W.m^{-2}$
$G_{efetivo}$	Irradiação solar efetiva nos módulos	$W.m^{-2}$
$G_{incidente}$	Irradiação solar	$W.m^{-2}$
$Gr$	Número de Grashof	Adimensional
$h$	Altura do coletor	m
$h$	Entalpia específica	$kJ.kg^{-1}$
$\bar{h}_f$	Coefficiente de convecção médio forçado	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$\bar{h}_{lam}$	Coefficiente de convecção médio laminar	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$\bar{h}_{turb}$	Coefficiente de convecção médio turbulento	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{cf}$	Coefficiente de convecção entre o coletor e o fluido	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_e$	Coefficiente de convecção entre coletor e o ar ambiente externo	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{ext}$	Coefficiente de convecção no exterior do coletor	$W.m^{-2}.K^{-1}$

Símbolo	Significado	Unidade
$h_f$	Coeficiente de convecção forçada	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{int}$	Coeficiente de convecção entre o coletor e o solo	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_n$	Coeficiente de convecção natural ou livre	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{ra}$	Coeficiente de convecção livre	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{ra}$	Coeficiente de radiação com o albedo	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{rsc}$	Coeficiente de radiação entre o solo e o coletor	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{sf}$	Coeficiente de convecção entre o solo e o fluido	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$H_t$	Altura total da chaminé	m
$k$	Condutividade térmica	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$k_f$	Condutividade térmica do fluido	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$k_s$	Condutividade térmica do solo	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$L$	Comprimento da seção analisada	m
$L_f$	Comprimento de entrada	m
$\dot{m}$	Vazão mássica	$kg.s^{-1}$
$Nu$	Número de Nusselt	Adimensional
$\varnothing$	Umidade relativa	Adimensional
$\varnothing_d$	Declinação	°
$\varnothing_{lat}$	Latitude	°
$p$	Pressão	Pa
$P$	Perímetro	m
$P$	Pressão	kPa
$P$	Pico de potência	kW
$P_\infty$	Pressão atmosférica	kPa
$P_{atm}$	Pressão atmosférica	Pa
$Pot_{fv}$	Potência do módulo fotovoltaico	W
$Pr$	Número de Prandtl	Adimensional
$\dot{Q}_{abs}$	Taxa de transferência de calor líquida absorvida pelo fluxo	W
$\dot{Q}$	Transferência de calor	W
$q$	Fluxo de calor	W
$q''_f$	Fluxo de calor por unidade de área	$W.m^{-2}$
$r$	Raio	m
$R$	Constante particular do gás ideal	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$Ra$	Número de Rayleigh	Adimensional
$r_c$	Raio do coletor	m
$R_c$	Refletividade total do coletor	Adimensional
$Re$	Número de Reynolds	Adimensional
$Re_L$	Número de Reynolds para uma placa plana	Adimensional
$R_v$	Refletividade total do vidro	Adimensional

Símbolo	Significado	Unidade
$t$	Tempo	s
$T$	Temperatura	°C
$t$	Espessura do material vítreo	m
$T_1$	Temperatura da cobertura vítrea	°C
$T_2$	Temperatura da superfície do solo	°C
$T_{2,0}$	Temperatura da superfície do solo no tempo anterior	°C
$T_3$	Temperatura do solo na região termicamente afetada	°C
$T_{\infty}$	Temperatura ambiente	°C
$T_{ab}$	Temperatura do albedo	°C
$T_c$	Transmissividade total do coletor	Adimensional
$T_f$	Temperatura do fluido	°C
$T_{f,e}$	Temperatura do fluido na entrada da seção analisada	°C
$T_{f,s}$	Temperatura do fluido na saída da seção analisada	°C
$T_m$	Temperatura média	°C
$T_{or}$	Temperatura de orvalho	°C
$T_v$	Transmissividade total do vidro	Adimensional
$u$	Velocidade	$m.s^{-1}$
$U_e$	Coefficiente global de transferência de calor na parte externa do coletor	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$U_s$	Coefficiente global transiente de transferência de calor para o solo	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$v$	Volume específico	$m^3.kg^{-1}$
$\dot{W}$	Potência	W
$\dot{W}_{liq}$	Potência líquida da planta	W
$w$	Hora solar	°
$w$	Velocidade	$m.s^{-1}$
$w_{vento}$	Velocidade externa do vento	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$x$	Coefficiente de perda de carga na turbina	Adimensional
$x$	Comprimento característico	m
$\alpha$	Difusividade térmica	$m^2.s^{-1}$
$\beta$	Coefficiente de expansão térmica	$K^{-1}$
$\Delta P_d$	Diferença de pressão dinâmica	kPa
$\Delta P_s$	Diferença de pressão estática	kPa
$\Delta T$	Diferença de temperatura	K ou °C
$\varepsilon$	Coefficiente de extinção do vidro	$m^{-1}$
$\varepsilon$	Emissividade	Adimensional
$\varepsilon_s$	Emissividade do solo	Adimensional
$\varepsilon_v$	Emissividade do vidro	Adimensional
$\eta$	Eficiência	Adimensional
$\eta_{módulo}$	Rendimento do módulo fotovoltaico	Adimensional

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Unidade</b>
$\eta_{perdas}$	Rendimento devido às perdas	Adimensional
$\eta_{temp}$	Rendimento devido às perdas por aquecimento do módulo	Adimensional
$\eta_{total}$	Eficiência total da planta	Adimensional
$\theta$	Ângulo de zênite	°
$\theta_2$	Ângulo refratado	°
$\rho$	Densidade	kg.m <sup>-3</sup>
$\rho_{\infty}$	Densidade do ar atmosférico	kg.m <sup>-3</sup>
$\rho_{atm}$	Densidade do ar atmosférico	kg.m <sup>-3</sup>
$\rho_s$	Refletividade do solo	Adimensional
$\rho_s$	Densidade do solo	kg.m <sup>-3</sup>
$\rho_v$	Refletividade do vidro	Adimensional
$\sigma$	Coefficiente de Stefan-Boltzmann	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup>
$\tau$	Tensão de cisalhamento	Pa
$\tau_v$	Transmissividade do vidro	Adimensional
$\mu$	Viscosidade absoluta	Pa.s
$\nu$	Viscosidade cinemática	m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a comunidade científica não tem um consenso sobre os elementos que geram o aquecimento global, até mesmo se este aquecimento é de fato produzido pela atividade humana ou uma sazonalidade da própria natureza, haja vista a descoberta dos ciclos naturais da Terra, entre os quais o ciclo de Milankovich, fenômeno este estudado por, dentre outros, Bennet (1990), Short *et al.* (1991) e Mayer e Appel (1999).

Jackson (2007) realizou um estudo sobre os efeitos da variação da temperatura na Terra e as suas possíveis causas, incluindo ainda análises de relatórios emitidos pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) concluindo que o principal fator que contribui para este aquecimento são os ciclos naturais. O entendimento destes ciclos é que as mudanças nos parâmetros orbitais da Terra geram maior incidência solar no outono para o hemisfério norte, ocorrendo a uma pequena taxa, mas suficiente para reduzir a quantidade de gelo no hemisfério norte. Como um sistema de retroalimentação, com a superfície de gelo menor, há uma menor reflexão dos raios solares de volta para o espaço, resultando em um aquecimento ainda maior na superfície terrestre.

Jackson (2007) ainda comprova, segundo um referencial teórico, que a quantidade de monóxido de carbono na atmosfera já foi muito mais elevada em milhares de anos passados, indicando a existência de ciclos. Estudando o isótopo de oxigênio nas geleiras, ele conseguiu descobrir que já houve outras eras de glaciação e de aquecimento na Terra. Tais ciclos podem ser observados na Figura 1.1. Nesta Figura, verifica-se que o planeta Terra já passou por vários períodos de glaciação e de aquecimento (linha azul na Figura 1.1), comprovando que o aquecimento global é sazonal, mesmo que em uma escala de milhares de anos. O mesmo acontece com a taxa de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera (linha verde na Figura 1.1) e com a poeira em suspensão (linha vermelha na Figura 1.1).

Todas estas medidas, de acordo com Jackson (2007), foram determinadas através de estudos realizados em materiais retirados de geleiras dos polos norte e sul.

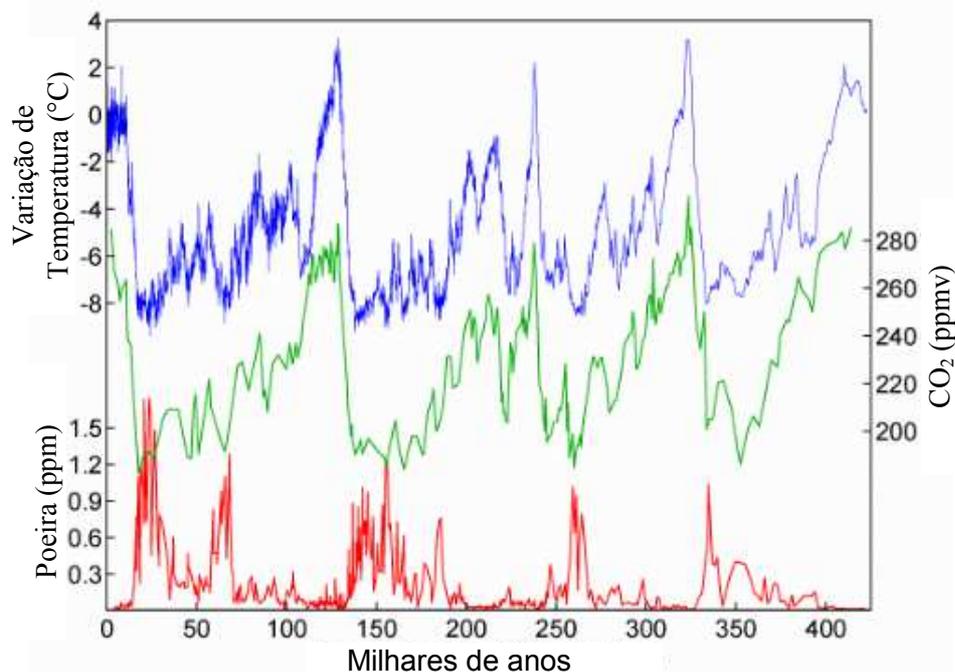


Figura 1.1: Variação de Temperatura, poeira e CO<sub>2</sub> nos últimos milhares de anos.

Fonte: Jackson (2007)

Sendo os ciclos de aquecimento passados certamente oriundo de causas naturais, o aquecimento global atual representa uma ameaça para a natureza, e certamente o ser humano age como catalizador deste processo de aquecimento ao utilizar combustíveis fósseis para a geração de energia.

Para o Brasil, é possível visualizar na Figura 1.2 a emissão de dióxido de carbono na atmosfera pelo setor industrial, conforme o Ministério de Ciência e Tecnologia (2009), em contraste com o consumo energético do mesmo setor, conforme EPE (2010). Para esta comparação, foi escolhido o setor industrial, por ser um setor de grande consumo energético. O lançamento de dióxido de carbono na atmosfera para o Brasil, contando todos os setores da economia, incluindo o setor de transportes, fica na casa dos 1,5 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> para o ano de 2005, e esta emissão teve um acréscimo de 69% em relação a 1995, ou seja, em um período de 10 anos. Através deste gráfico, fica clara a relação direta da emissão de dióxido de carbono com o crescimento industrial do país. Vale ressaltar que até a presente data não houveram relatórios oficiais emitidos com valores mais atuais.

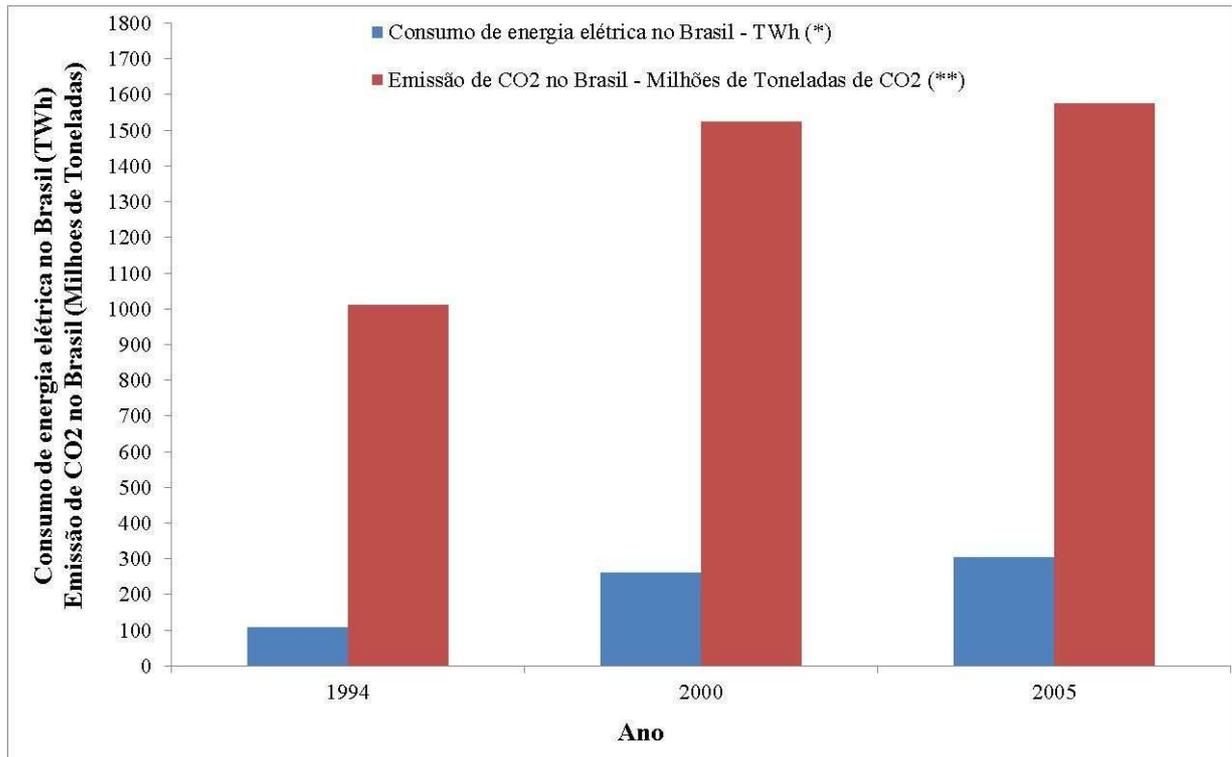


Figura 1.2: Relação entre consumo energético e emissão de dióxido de carbono.

Fontes: (\*) EPE (2010); (\*\*) Ministério de Ciência e Tecnologia (2009)

Deixando de lado as especulações sobre os níveis e o consumo das reservas de petróleo e os efeitos nocivos ou não das emissões de gases tóxicos no meio ambiente, é preciso ter consciência de que o mundo ao nosso redor é repleto de energia proveniente de fontes naturais. Utilizar eficientemente a energia chamada de limpa (natural) que está ao nosso redor, seja a energia contida nos ventos, a energia solar que incide no globo terrestre, reservatórios geotérmicos, movimento das marés, diferença térmica e de pressão existente no fundo dos oceanos, energia proveniente do lixo, entre muitas outras, é um desafio para a engenharia. É conveniente queimar petróleo para produzir energia, mas converter energias limpas em energia elétrica é um desafio que a tecnologia dos dias atuais já é capaz de realizá-la, e com bom rendimento, entretanto ainda com custos nem sempre competitivos.

Uma forma de conversão de energia utilizada em muitos lugares é a energia nuclear. Apesar de não ser uma fonte renovável e também provocar o aquecimento do meio ambiente, ela não emite dióxido de carbono, e, portanto não colabora com o efeito estufa. A massa de material nuclear que sobra do processo é então relativamente pequena se comparada à energia gerada, entretanto este rejeito radioativo deve ser armazenado em locais seguros por muitos anos, décadas ou até séculos, dentro de depósitos situados dentro das próprias unidades consumidoras, em tambores metálicos de 200 litros confinados em contêineres de concreto,

com refrigeração e monitoramento constante, até que suas temperaturas atinjam níveis seguros para transportá-los para reciclagem ou estocagem definitiva. Apesar da relação existente entre a grande energia produzida e o pequeno resíduo gerado, são rejeitos muito perigosos. As usinas nucleares precisam de uma fonte abundante de água em sua proximidade, para refrigeração do sistema, o que aumenta o risco destes eventos naturais em sua operação. Tal fato pode ser comprovado pelo recente desastre em Fukushima, ocorrido em 11 de março de 2011 no Japão, onde um tsunami comprometeu a operação da usina nuclear e a mesma entrou em colapso, liberando radiação para o ambiente. Devido ao grande risco na captação, transporte, manuseio e descarte, além de imprevistos como em Fukushima, este tipo de energia começa a ser preterida em muitos países. Devido à falta de recursos hídricos para instalação de hidrelétricas, os países que mais utilizam a energia nuclear são os Estados Unidos, Canadá, França, Japão e Rússia.

Entre as fontes renováveis existentes, há algumas que geram certo grau de impacto ambiental, como as hidrelétricas, que impactam diretamente na fauna e na flora. Porém, por se tratar de uma usina onde o fluido de trabalho é a água proveniente das chuvas e dos rios, o custo desta energia se torna muito atraente. Uma desvantagem deste recurso são as características geográficas específicas que devem existir na região de instalação, pois é necessária uma conformação de bacia hidrográfica favorável. Quando instalada longe dos centros consumidores, o aproveitamento é prejudicado pelos custos de transmissão e pelas perdas, conforme EPE (2011). A Figura 1.3 descreve o funcionamento de uma hidrelétrica. Dentre os países que possuem características hidrográficas favoráveis e que utilizam esta tecnologia em grande escala destacam-se o Brasil e a China.

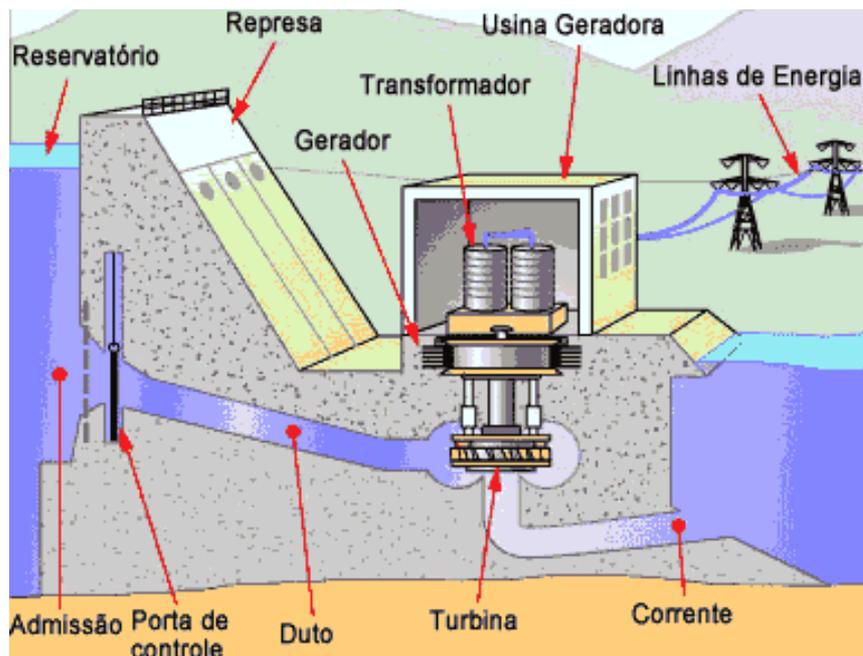


Figura 1.3: Esquema de uma usina hidrelétrica.

Fonte: How Stuff Works (2010)

Outra forma de conversão de energia, que não é tão comum, pois depende fortemente da conformação orográfica<sup>1</sup> da baía para favorecer um potencial maior de energia é a energia das marés. Em algumas regiões da França, por exemplo, a maré atinge uma diferença de altura de aproximadamente 13 metros. Conforme Rourke *et al.* (2010), quando a maré está baixa, um dique é aberto deixando água represada fluir novamente para o oceano, equilibrando o nível de água. Após o equilíbrio atingido, esta barragem é fechada, e o nível do oceano volta a ficar superior ao nível do lado continental da usina quando a maré sobe. Assim que o nível chega ao máximo, a comporta é aberta e o escoamento muda de sentido, girando as turbinas em outra direção. Após o equilíbrio, o ciclo se repete. A ilustração deste tipo de usina pode ser visualizada na Figura 1.4. As principais desvantagens desta tecnologia são a produção intermitente de energia (em horários esparsos) e o fluido de trabalho ser a água salina, extremamente corrosiva. Devido à dependência da conformação orográfica da região, os países que se destacam no uso deste tipo de tecnologia são o Japão, França e Inglaterra.

<sup>1</sup> Chama-se orografia ao estudo das nuances do relevo de uma região.



Figura 1.4: Ilustração de uma usina de energia das marés.

Fonte: CDCC – USP (2010)

Conforme Drollette (2006), a energia das ondas pode ser extraída também com diversos tipos de equipamentos, sendo que apenas 0,2% desta energia poderia suprir toda a demanda terrestre, caso houvesse possibilidades econômicas razoáveis de implantação para este fim. Existem diversas formas de se captar esta energia, uma delas é chamada de “Terminadores”, que capturam a energia das ondas em posição perpendicular ao seu movimento. Conforme a Figura 1.5, esta planta inclui um componente imóvel e outro móvel, dependente da onda, funcionando quase como um pistão automobilístico, movendo-se para cima e para baixo para pressurizar ar que aciona uma turbina.

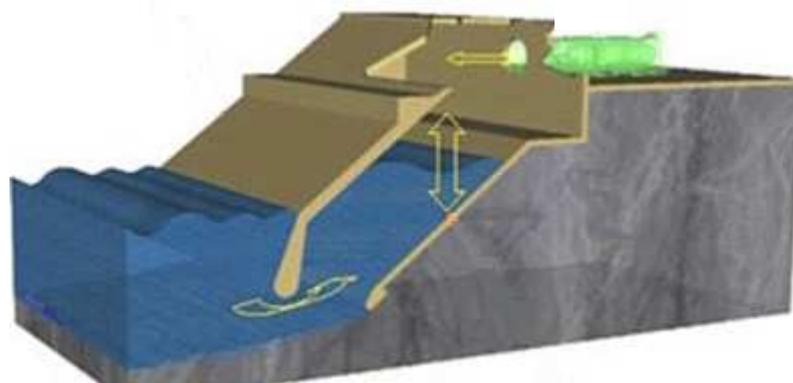


Figura 1.5: Ilustração de uma usina de energia das ondas tipo “terminador”

Fonte: How Stuff Works<sup>2</sup> (2010)

Outro tipo de extração de energia das ondas é chamado de “absorvedor pontual”. Estes equipamentos não ficam posicionados de forma específica ao movimento das ondas, e sim, ficam flutuando e podem absorver a energia das ondas provenientes de qualquer direção. Em um tubo vertical sob a água, as ondas passam e acionam um pistão, que pressuriza a água no interior do tubo e movimenta uma turbina conectada a um gerador elétrico. A Figura 1.6 ilustra este tipo de usina. Tanto as usinas do tipo terminadores como também as usinas do tipo absorvedor pontual estão com a situação de desenvolvimento em fase inicial, mas testes estão sendo conduzidos no Reino Unido, Portugal, Noruega e no Japão.



Figura 1.6: Usina de energia das ondas tipo “absorvedor pontual”.

Fonte: How Stuff Works<sup>2</sup> (2010)

Já nas usinas geotérmicas, é usada a energia liberada por gêiseres em forma de vapor d’água para alimentar turbinas operando no ciclo Rankine<sup>2</sup>, produzindo energia. O líquido resfriado que sai da turbina é enviado de volta para ser aquecido novamente no leito terrestre para gerar mais vapor. Porém, esta é outra forma de energia que depende de regiões que possuam este tipo de fenômeno natural, elevando os custos de transmissão. A Figura 1.7 mostra como este tipo de usina opera. Apesar desta usina parecer ser uma fonte totalmente limpa, ela contribui para o aquecimento global, visto que extrai calor do interior do solo, a uma taxa maior que a natural, e o joga na atmosfera. Dentre os países que contam com este recurso encontram-se os Estados Unidos (Califórnia), México, Japão, Filipinas, Quênia, Islândia, Nova Zelândia e Portugal.

<sup>2</sup> Ciclo Rankine: Ciclo no qual vapor de água no estado saturado ou superaquecido aciona uma turbina para fins de geração de energia elétrica. Muito utilizado em usinas termoelétricas, nucleares, geotérmicas e termossolares.

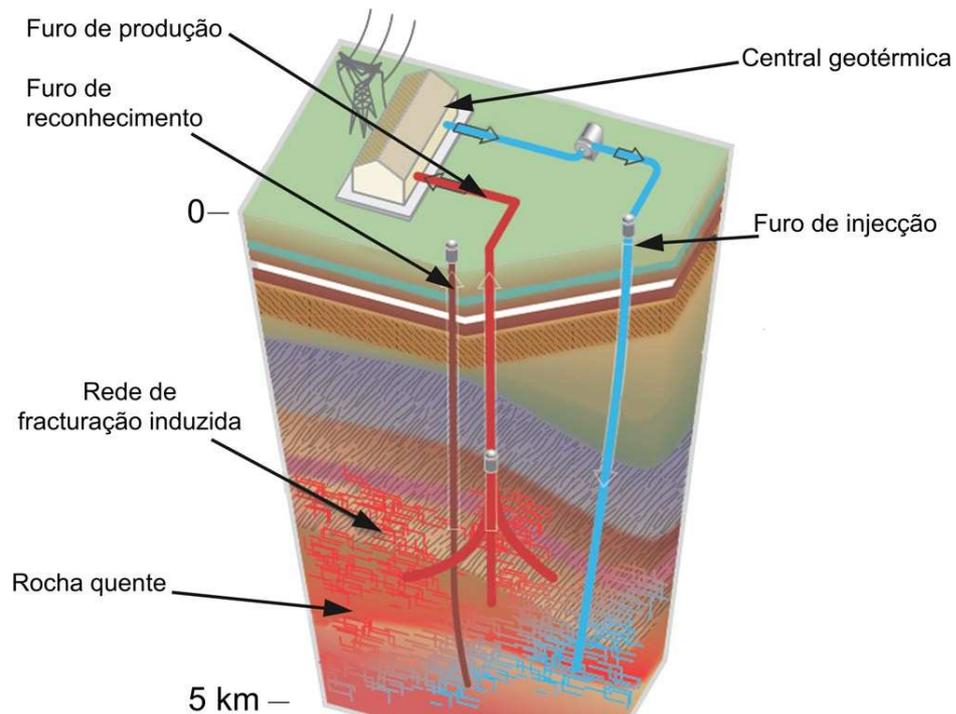


Figura 1.7: Esquema de uma usina geotérmica

Fonte: LNEG (2012)

Outra forma de aproveitamento de energia renovável que vem sendo usada de forma crescente é a eólica. O vento é uma fonte abundante de energia e existe em todo o globo terrestre. Os ventos são formados devido a um conjunto de fatores, sendo os principais o aquecimento de uma massa de ar, a diferença de pressão e a rotação do globo terrestre. Quando próxima do solo, durante o dia, a massa de ar se aquece, sofrendo redução da massa específica, promovendo uma força de empuxo desta para regiões mais altas, onde ele passa a ocupar o espaço do ar resfriado com massa específica maior, que por sua vez desce para a superfície.

Além disso, uma diferença de pressão atmosférica também pode provocar o vento, pois áreas com menor pressão atmosférica estão sujeitas a serem comprimidas por áreas de maior pressão. Somado a estes fatores, a rotação terrestre naturalmente provoca uma movimentação das massas mais aderentes à superfície, que tendem a acompanhar a superfície esférica, resultando em massas que se interpõem umas às outras. Obter um mapa da distribuição de ventos no país ou na região de interesse é o principal ponto a ser analisado antes de implantar uma usina deste tipo. A Figura 1.8 mostra o campo da velocidade dos ventos no Brasil.

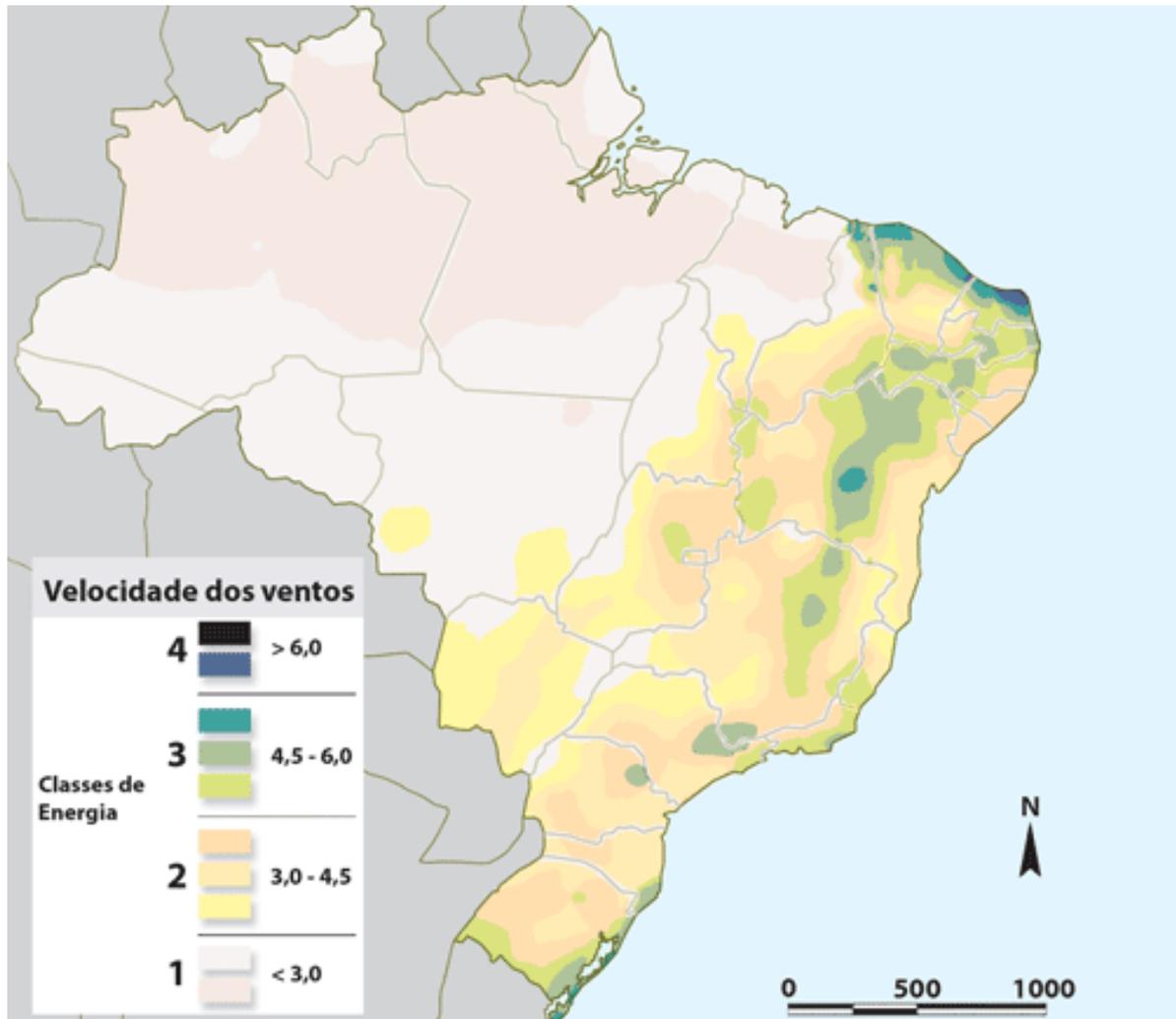


Figura 1.8: Mapa eólico do Brasil

Fonte: ANEEL (2010)

A captação e aproveitamento desta energia, porém, encontra problemas no quesito custo, visto necessitar de geradores com pás de captação gigantescas, do porte da asa de um avião comercial, em razão da baixa massa específica do ar. Além disto, esta fonte de energia necessita de elementos estruturais grandes e uma velocidade mínima do ar para acionar os geradores. A sazonalidade dos ventos durante as horas do dia e a necessidade de estar alocado em uma área propícia para ventos também são empecilhos para implantação. São muitas variáveis a serem levadas em consideração, e apenas uma delas pode colocar em risco o investimento. A Figura 1.9 (a) ilustra a montagem de um gerador eólico e a Figura 1.9 (b) ilustra uma fazenda eólica com diversos geradores.



Figura 1.9: (a) Montagem das pás de um gerador. (b) Fazenda ou parque eólico  
 Fonte: (a) e (b) ELETROBRÁS TERMONUCLEAR S. A. (2012)

A Figura 1.10 ilustra o comportamento da potência (W) com a velocidade do vento (m/s), além de indicar a velocidade mínima para início da geração, neste caso, 4 m/s. Porém, salienta-se que a curva varia de acordo com o fabricante e modelo de turbina.

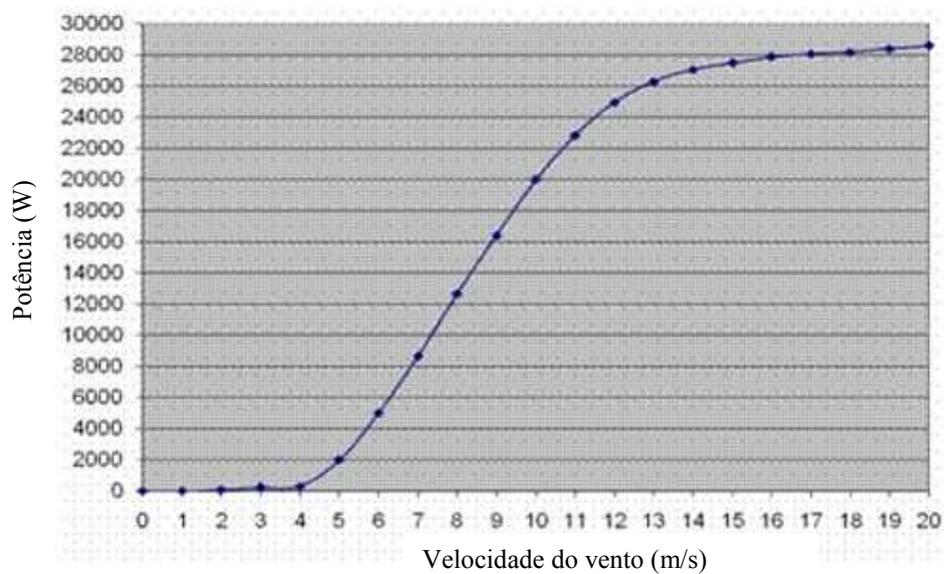


Figura 1.10: Perfil de potência (W) x velocidade do vento (m/s) para uma turbina eólica  
 Fonte: ALVESTA ENERGY (2010)

A energia solar é uma das mais promissoras fontes de energia limpa no globo terrestre, além de ser a mais abundante. Entre as diversas formas de aproveitar esta energia, destaca-se a fotovoltaica e a termossolar. A energia fotovoltaica consiste em converter diretamente, através de dispositivos específicos, a energia solar em elétrica, e a termossolar utiliza a energia solar para gerar energia elétrica indiretamente, aquecendo um fluido de trabalho para produção de energia através de outros meios.

As células fotovoltaicas (ver Figura 1.11) geram energia quando feixes luminosos desprendem elétrons nos átomos de um semicondutor, o Silício. Esta tecnologia ainda possui custo elevado, mas o qual está decrescendo desde sua descoberta, e sua eficiência tem aumentado significativamente (de aproximadamente 16% em 2006 para aproximadamente 29% em 2009). Há ainda células fotovoltaicas híbridas, que utilizam o efeito Seebeck<sup>3</sup> para aproveitar a diferença de temperatura e aumentar a potência gerada com o mesmo calor fornecido, aumentando a eficiência destas células para aproximadamente 40%.



Figura 1.11: Ilustração de uma usina fotovoltaica

Fonte: CHINA ENERGY SECTOR (2012)

Um dos métodos de conversão de energia solar em energia elétrica utilizando o conceito de energia termossolar consiste na utilização de espelhos focalizados em tubulações especialmente desenvolvidas para aumentar a eficiência na qual circula um fluido de trabalho que alimenta trocadores de calor para a produção de vapor que é utilizado em turbinas operando no ciclo Rankine. A Figura 1.12 ilustra uma usina termossolar no Arizona (EUA), com linhas de aquecimento lineares, enquanto a Figura 1.13 mostra uma usina termossolar em Sevilha, na Espanha, onde espelhos convergem a energia solar para uma superfície de aquecimento.

---

<sup>3</sup> O efeito Seebeck é a produção de uma diferença de potencial (tensão elétrica) entre duas junções de condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando elas estão a diferentes temperaturas (força eletromotriz térmica). É o reverso do efeito Peltier que é a produção de um *gradiente de temperatura* em duas junções de dois condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando submetidos a uma *diferença de potencial* (tensão elétrica) em um circuito fechado (consequentemente, percorrido por uma corrente elétrica).

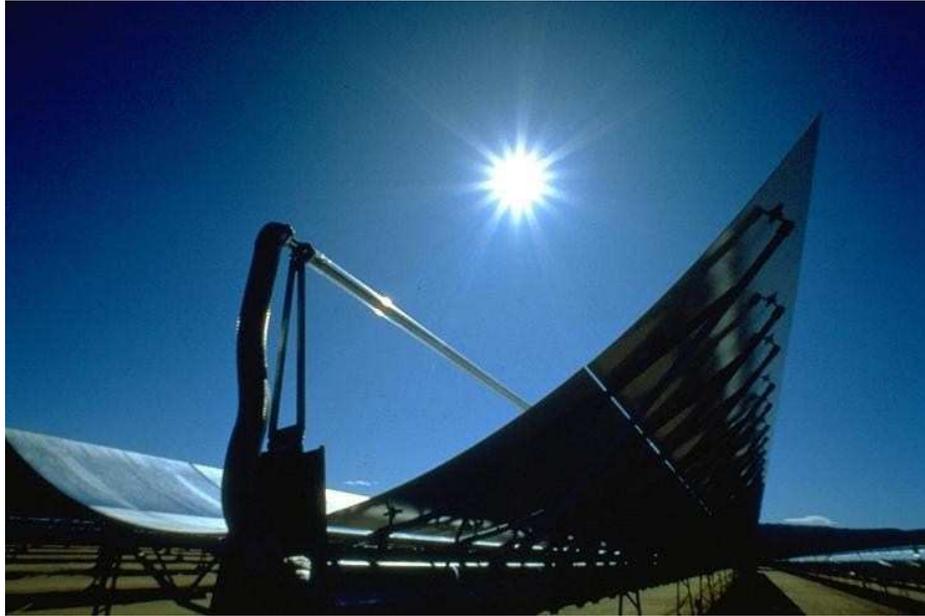


Figura 1.12: Ilustração de uma usina termossolar no Arizona, EUA

Fonte: CLEAN TECHNICA (2010)



Figura 1.13: Ilustração de uma usina termossolar em Sevilha, Espanha

Fonte: GREEN DOLLARS AND SENSE (2009)

O potencial energético atual de fontes renováveis é apresentado em um estudo conduzido por Hoogwijk e Graus (2008), que demonstram o potencial de utilização de energias renováveis no mundo. Verifica-se que de todas as energias renováveis citadas no estudo, aproximadamente 77% do potencial de energias renováveis é oriunda da fonte solar, sendo 48% decorrente da energia fotovoltaica, e 29% da energia termossolar.

A tabela 1.1 lista alguns dados de potencial energético de fontes alternativas, que podem ser também visualizados na Figura 1.14. Nesta tabela, os autores dividiram a energia solar em energia termossolar e energia fotovoltaica. A energia termossolar pode ser utilizada

para aquecimento de ar ou água para geração indireta de energia elétrica, e a energia fotovoltaica é aquela geração direta de energia solar em elétrica através de células específicas. É importante salientar a informação contida nesta tabela sobre o potencial de energia renovável no mundo de 980.700 TWh/ano. Para ter uma noção do que é este potencial, a produção total de energia em todo o globo foi de 19.015 TWh/ano em 2006, de acordo com National Geographic (2009).

Da energia produzida em 2006, cerca de 82% foi proveniente de combustíveis fósseis e nuclear, e apenas 0,02% oriunda da energia solar. Outra informação importante é a estimativa de demanda de taxa de energia da população da Terra para 2020 que será de 20 TW. A energia emitida pelo do Sol, que incide na parte sólida da Terra, é mensurada em aproximadamente 120.000 TW, energia 6.000 vezes maior que a necessária, o que mostra o grande potencial existente desta fonte de energia.

Tabela 1.1 Potencial energético para energias renováveis, por região, em TWh/ano

Região	Termossolar	Fotovoltaica	Hídrica	Eólica (Terra)	Eólica (Mares)	Oceânica	Geotérmica
América do Norte	5880	20160	1400	43680	560	19040	1400
Europa	7140	37240	3360	23240	2520	13160	2240
África	190120	241640	2240	9240	280	5320	1400
Asia	6160	71120	3920	2800	840	28840	3360
América Latina	16520	36680	2800	11200	1400	8960	3080
Oceania	52360	66920	280	15960	840	14280	1120
<b>Mundo</b>	<b>278180</b>	<b>473760</b>	<b>14000</b>	<b>106120</b>	<b>6440</b>	<b>89600</b>	<b>12600</b>

Fonte: Hoogwijk e Graus (2008).

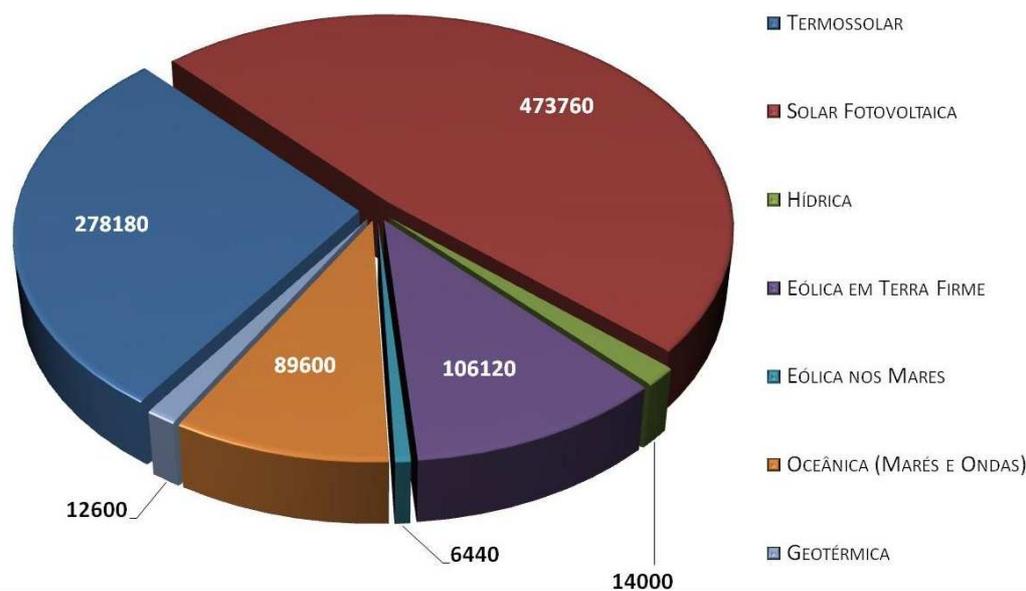


Figura 1.14: Potencial energético mundial para energias renováveis (TWh/ano)

Fonte: Hoogwijk e Graus (2008).

## 1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

Desta forma, apresentado o cenário atual das principais fontes de energia alternativas presentes ao nosso redor, um novo conceito para o aproveitamento de energia está ganhando espaço, a chaminé solar, que pode também ser chamada de gerador eólico solar.

Uma chaminé solar é um gerador eólico solar, pois consiste em um coletor solar de diâmetro grande instalado a poucos metros do solo, feito de material translúcido, preferencialmente de vidro para manter o calor por efeito estufa, impedindo que o mesmo seja emitido novamente para a atmosfera na forma de radiação de ondas longas. Na parte central deste coletor é inserida uma chaminé para transportar esta massa de ar aquecido até uma região de menor pressão atmosférica, garantindo uma força de empuxo maior. Como será visto adiante, a altura desta chaminé e outras características geométricas afetam consideravelmente o fluxo de massa neste dispositivo, impactando diretamente na potência gerada pela turbina. A turbina pode ser localizada na base da chaminé, em posição vertical, ou então várias turbinas podem ser dispostas radialmente próximas da chaminé. Conforme pode ser observado na Figura 1.15, o solo pode conter algum material absorvedor de energia, como um solo rochoso, para manter a temperatura no interior do coletor superior à temperatura ambiente por um período maior de tempo, garantindo uma inércia térmica maior e aquecendo o ar em seu interior mesmo durante a noite.

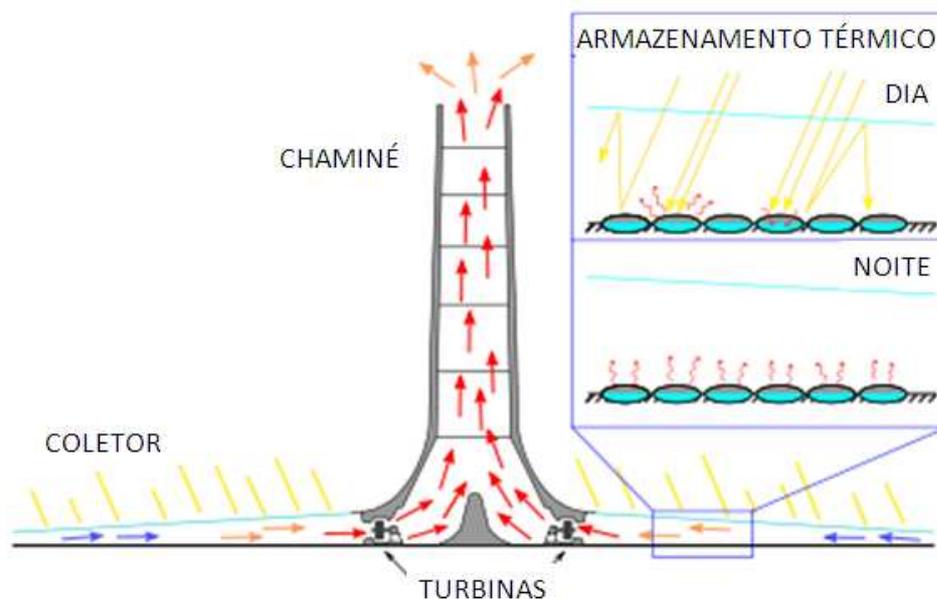


Figura 1.15: Esquema de funcionamento de uma chaminé solar.

Fonte: SQUIDDO (2012)

Um inconveniente da chaminé solar é a grande altura que a mesma deve possuir para produzir maior quantidade de energia, o que eleva os custos de construção de uma usina deste tipo. Além disso, muitas usinas utilizam material plástico para revestir o coletor, e tal material não gera o efeito estufa necessário, pois é transparente para a radiação de onda longa. Ao contrário do vidro, que é um material opaco para esta banda de radiação, mas que possui um custo mais elevado.

Para ilustrar melhor o problema do material utilizado na cobertura e o consequente impacto no custo, uma relação de espectro de radiação é fornecida por Incropera e Dewitt (1998) e é ilustrada na Figura 1.16. Neste espectro de radiação observa-se a influência da temperatura do corpo emissor com o comprimento de onda eletromagnética gerada por este corpo, assim como a relação do poder emissivo deste corpo com a temperatura. É por este motivo que fontes a altas temperaturas como o Sol (temperatura da superfície média a 5777K) emitem radiação, sobretudo em comprimentos de onda curtos, e objetos aquecidos a temperaturas mais baixas só conseguem emitir radiação na forma de ondas longas.

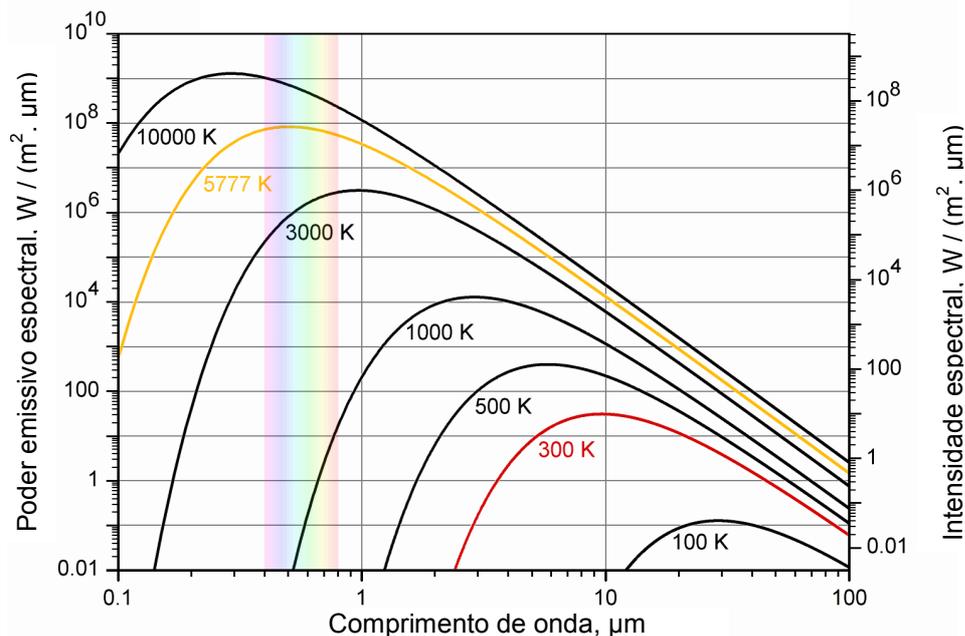


Figura 1.16: Poder emissivo espectral de corpos negros

Fonte: Incropera e Dewitt (1998)

Surge a questão: como é o comportamento dos objetos translúcidos que são utilizados em coberturas com fins de aquecimento? Alguns materiais, como plásticos, permitem a passagem de radiação principalmente na forma de ondas longas, diferentemente do vidro, que permite a passagem de radiação apenas na forma de ondas curtas, permitindo desta forma o efeito estufa desejado em algumas aplicações. Na Figura 1.17 visualiza-se o comportamento

da transmitância do vidro conforme o comprimento de onda que incide sobre o mesmo. Para polímeros, conforme pode ser observado na Figura 1.18, não ocorre uma banda passante de radiação para comprimentos de ondas curtos, como no vidro. A transmissão decresce gradualmente com o aumento do comprimento de onda, até um patamar onde o efeito estufa deixa de ocorrer. Apesar de estudos e pesquisas apontarem para o desenvolvimento de materiais sintéticos que tentam reproduzir o comportamento do vidro, esta tecnologia ainda não é comercialmente viável.

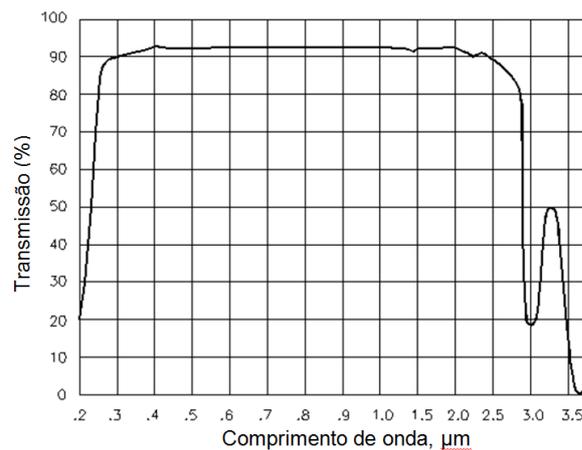


Figura 1.17: Transmissão versus comprimento de onda para o vidro comum  
Fonte: SINCLAIR (2012)

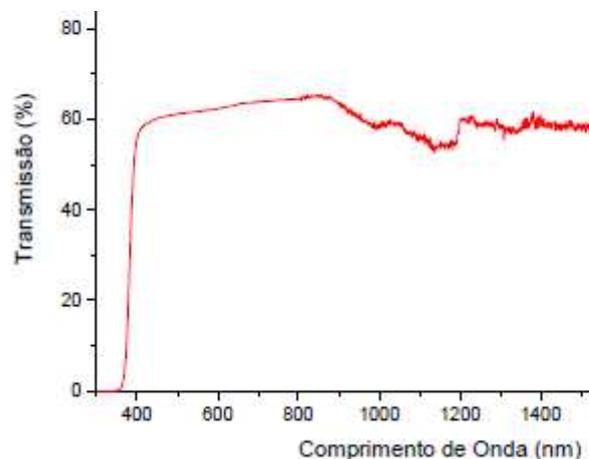


Figura 1.18: Transmissão versus comprimento de onda para o policarbonato  
Fonte: Sardeiro (2007)

A respeito das chaminés solares, sabe-se que uma usina solar eólica, ou chaminé solar, já funcionou por um curto período de tempo, entre 1982 e 1989, em Manzanares, Espanha, e outras estão em fase de projeto. Conforme Schlaich *et al.* (1983) e Haaf (1984), um modelo experimental de pequeno porte foi construído em 1982 sob a coordenação do engenheiro alemão Jörg Schlaich, em Manzanares, Ciudad Real, a 150 km ao sul de Madrid, Espanha, com o financiamento do governo alemão (ver Figura 1.19). A chaminé possuía uma altura de 195 metros, diâmetro de 10 metros e um coletor de 244 metros de diâmetro, obtendo um pico

de potência na ordem de 50 kW. Contudo, esta era uma planta experimental sem o propósito de geração comercial. Ao invés disto, diferentes experimentos foram conduzidos no intuito de analisar o comportamento da usina quando a mesma operava com vidros simples, duplos, materiais plásticos, e ainda diferentes absorvedores junto ao solo. Durante sua operação, dados foram coletados com 180 sensores medindo temperaturas internas e externas, umidade e velocidade do vento em seu interior.

Esta planta piloto operou por aproximadamente oito anos. Foi uma surpresa para os engenheiros que durasse tanto tempo, pois foi projetada para funcionar apenas pelo período de teste, isto é, três anos. Sem manutenção, os cabos que sustentavam a chaminé oxidaram e acabaram rompendo em uma tempestade em 1989, causando a queda da chaminé, visto que, após o período de testes, não houve investimentos na manutenção da estrutura da usina.

Baseado nesta planta piloto, Schlaich (1995) estimou que para uma geração de 100 MW de potência, um coletor de 20 km<sup>2</sup> e uma chaminé de 1000 m de altura são necessários. Devido ao fato do maior percentual dos custos estar em sua construção e não em sua operação (combustível solar, baixa manutenção e aproximadamente 7 operários), o custo da energia é amplamente determinado pelas taxas de juros e anos de operação, variando de €\$0,05/kWh para 4% em 20 anos até €\$0,15/kWh para 12% em 40 anos.



Figura 1.19: Chaminé solar em Manzanares, Espanha.  
Fonte: METEOROLOGICAL REACTORS (2012)

Conforme Muñoz-Lacuna (2006), há uma proposta para construção de uma chaminé solar em Ciudad Real, Espanha, batizada de Torre Solar da Ciudad Real. Se construída, será a primeira do tipo na união européia, e possuirá uma altura de 750 metros, com uma potência instalada de 40 MW.

O coordenador da construção do protótipo em Manzanares, Jörg Schlaich, fundou a empresa Enviromission, de consultoria na construção de chaminés solares. Há propostas desta empresa para a construção de chaminés solares para a produção de 200 MW de energia em Buronga, Austrália e no condado de La Paz, Arizona, Estados Unidos, sendo que a decisão está sendo tomada em função de melhores taxas, terreno subsidiado, entre outros fatores. Um empecilho para tal implantação é o custo, estimado em 700 milhões de dólares americanos.

Também em 2006, a empresa francesa Elioth anunciou na imprensa, conforme Elioth (2010), a conclusão do projeto de uma “montanha solar” (Figura 1.20). Trata-se de um projeto inovador que utiliza a encosta de montanhas para a construção da chaminé solar, reduzindo os custos de construção. O coletor é instalado no pé da montanha, e possui um diferencial que é possibilitar a ampliação da capacidade instalada com o tempo.

Conforme Elioth (2010), o custo inicial estimado fica em torno de 5 a 7,5 milhões de euros, para uma área de coletor solar de 20 ha e para uma altura efetiva de 700 m, com capacidade instalada de 1MW, gerando até 2,5 GWh/ano. A capacidade máxima para ampliação é para uma área coberta de 850 ha e uma altura efetiva de 1500 m, com capacidade instalada de 100MW, gerando até 250 GWh/ano, a um custo de 150 milhões de euros, ainda caro, mas ainda mais em conta que a concorrente Enviromission.



Figura 1.20: Montanha Solar.

Fonte: Elioth (2010)

Em 2008, conforme Cloete (2008), o governo da Namíbia aprovou uma proposta para a construção de uma chaminé solar para a geração de 400 MW de energia, batizada de *green tower*. A proposta é construir uma torre de 1500 metros de altura com diâmetro de 280 metros, com a base de 37 km<sup>2</sup> de estufa onde milho será cultivado.

Em função destas referências, e pelo fato de que tais chaminés solares recentemente estão sendo cogitadas para serem implantadas em diferentes locais do planeta, então esta pesquisa focará o estudo de um modelo matemático e numérico para analisar a viabilidade técnica de implantação de uma usina solar eólica no Brasil.

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral deste trabalho é apresentar dados que justifiquem ou não a implantação de uma usina que opere pelo princípio de uma chaminé solar no Brasil, avaliando o potencial energético brasileiro para esta tecnologia.

Para tanto, são apresentados os seguintes objetivos específicos:

- Levantamento da incidência de irradiação solar no território brasileiro, por região e definição dos parâmetros solares e climáticos de entrada nas simulações computacionais para cada região brasileira;
- Pesquisa teórica sobre os parâmetros de perda de carga em turbinas eólicas;
- Estudo do modelo matemático utilizado para definir o calor absorvido pelo coletor, a vazão de ar e a potência total gerada pela turbina;
- Desenvolvimento de um código computacional na linguagem C++ para a simulação de chaminés solares;
- Validação do modelo com os resultados obtidos no protótipo experimental de Manzanares;
- Análise do potencial energético em território brasileiro no inverno e no verão, demonstrando os resultados em forma de isolinhas;
- Estudo da relação da altura da chaminé e do diâmetro do coletor com a potência gerada para o território brasileiro, utilizando o modelo previamente validado. Uma superfície de resposta é proposta para prever matematicamente o comportamento da potência e energia gerada em função destes parâmetros;

- Análise térmica do material utilizado na cobertura do coletor solar, utilizando, para tal, vidros comuns (sem aditivos e incolores) de diversos coeficientes de extinção, para verificação da influência deste parâmetro na transmitância total do material da cobertura e consequente potência gerada;
- Uso de células fotovoltaicas acopladas à planta para aumentar a produção de energia e estudo da influência da posição do conjunto de células fotovoltaicas em sua eficiência e na geração de potência.

### 1.3 JUSTIFICATIVA TEÓRICA E PRÁTICA

Um estudo conduzido por Dienstmann (2009) comparou e analisou as diferentes formas de aproveitamento de energia solar existentes atualmente, focando-as separadamente. Entre estas formas de aproveitamento de energia, destacam-se algumas, como os módulos fotovoltaicos, fotovoltaica concentrada, termossolar parabólico e chaminés solares. No estudo conduzido por Dienstmann (2009), os parâmetros comparados são mostrados na tabela 1.2.

Tabela 1.2 Potencial energético para energias renováveis, por região, em TWh/ano

	PV (Fotovoltaica)	PV Concentrada	Termossolar	Chaminé Solar
Eficiência (%)	5-25	4-10	15	1,5
Custo de implantação (US\$/W)	3-1500	1,5-14	3	3,5
Custo da energia gerada (US\$/kWh)	0,15	3	0,14	0,4
Operação e manutenção	Excelente	Excelente	Ruim	Excelente
Complexidade	Alta	Alta	Média	Baixa
Estocagem de energia	Ruim	Ruim	Boa	Boa
Durabilidade (anos)	25-30	<5	>20	>20
Facilidade (instalação)	Fácil	Fácil	Complexo	Moderado

Verifica-se na tabela 1.2 que, apesar da baixa eficiência que a tecnologia atual de chaminés solares proporciona na geração de energia elétrica, esta tecnologia possui baixa complexidade, baixo custo de operação e manutenção, sendo ideal para países em desenvolvimento ou para regiões com menores recursos. Possui alta durabilidade e, conforme Dienstmann (2009), um retorno do investimento em um curto período de tempo, na ordem de 2,5 anos para uma planta de 200 MW. A estocagem de energia apresenta um diferencial, pois a inércia térmica do solo permite o aproveitamento da energia armazenada no solo no período noturno, quando não há radiação solar, o que permite uma potência básica constante.

Baseado no panorama estudado por Dienstmann (2009) há a possibilidade de geração combinada de energia envolvendo chaminés solares e módulos fotovoltaicos instalados abaixo do coletor vítreo, aumentando a eficiência da planta e a potência de saída. Desta forma, um estudo matemático e numérico de como um arranjo simples de chaminé solar funciona é essencial para fundamentar novos estudos de aumento de eficiência para este tipo de tecnologia. Assim, a escolha destas duas formas de aproveitamento de energia solar fica justificada, dentre as demais apresentadas.

Quanto ao tema de estudo, o mesmo é importante, pois serve como referência para profissionais da área que porventura decidam investir neste tipo de energia limpa e renovável no Brasil. Do ponto de vista prático, fornece dados para identificar a relação entre parâmetros construtivos com a potência gerada, favorecendo uma otimização da planta, fornece ainda, um mapeamento do potencial energético desta tecnologia em cada região do Brasil. Do ponto de vista teórico, fornece um modelo de análise confiável e condizente com o estado da arte dos mecanismos físicos que governam esta tecnologia, pois agrega o efeito das múltiplas reflexões de radiação no material vítreo e ainda a geração combinada com módulos fotovoltaicos.

#### 1.4 ESTRUTURA DESTE DOCUMENTO

O capítulo atual apresenta uma introdução sobre o tema, uma breve revisão bibliográfica sobre as energias renováveis existentes, o panorama energético atual, assim como o potencial energético de fontes renováveis. É descrito o funcionamento de uma chaminé solar e sua importância no contexto energético mundial. Neste capítulo, apresenta-se ainda a justificativa do trabalho, os objetivos esperados e a metodologia empregada no mesmo.

Uma revisão bibliográfica sobre chaminés solares, de modo a divulgar o estado da arte desta tecnologia, é apresentada no capítulo 2, que é organizado de forma a abranger as várias frentes de pesquisa conduzidas por cientistas de todo o mundo, entre elas um breve histórico sobre esta tecnologia, estudos sobre as características construtivas e geométricas de chaminés solares, análises de viabilidade técnica e econômica, modelos matemáticos e numéricos, modelos experimentais e modelos inovadores.

O capítulo 3 conta com a fundamentação teórica que envolve os modelos matemáticos escolhidos para a análise e a justificativa de seu uso. Todas as equações que governam o fenômeno são descritas detalhadamente, de forma a permitirem o entendimento do programa computacional confeccionado para a análise.

O desenvolvimento do código computacional, seu processo de funcionamento, a verificação de alguns modelos propostos e suas validações com base em dados experimentais obtidos em Manzanares, Espanha, são apresentados no capítulo 4. As razões para as divergências entre os modelos estudados e propostos são apresentados e discutidos.

Os resultados obtidos para a geração de energia por uma chaminé solar, energia gerada por módulos fotovoltaicos (por unidade de área) e o pico de potência alcançado para uma planta de geometria predefinida para o território brasileiro é apresentado no capítulo 5, onde ainda são discutidos e apresentados resultados adicionais de sensibilidade, no que diz respeito à influência da qualidade do material vítreo, localização dos módulos fotovoltaicos, número de elementos do modelo numérico e a influência dos parâmetros geométricos da planta (diâmetro do coletor e altura da chaminé) nos parâmetros energéticos supracitados de saída da simulação.

O capítulo 6 desta tese apresenta uma conclusão sobre os resultados obtidos, e apresenta as principais contribuições acadêmicas deste trabalho de pesquisa, além de sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De maneira a situar o estado da arte atual, este capítulo é dividido em tópicos correlatos, partindo da história da concepção desta ideia até o estado de tecnologia atual.

### 2.1 HISTÓRIA

Uma das mais antigas descrições de chaminés solares para a geração de potência foi escrita em 1903 por Isidoro Cabanyes, um coronel da artilharia espanhola. Ele propôs publicamente o *Proyecto de motor solar* (projeto de motor solar) introduzindo um aparato consistindo de um aquecedor de ar anexado a uma casa com chaminé. No interior da casa, algo semelhante a uma turbina eólica é inserida com o propósito de geração de energia, como mostrado na Figura 2.1.

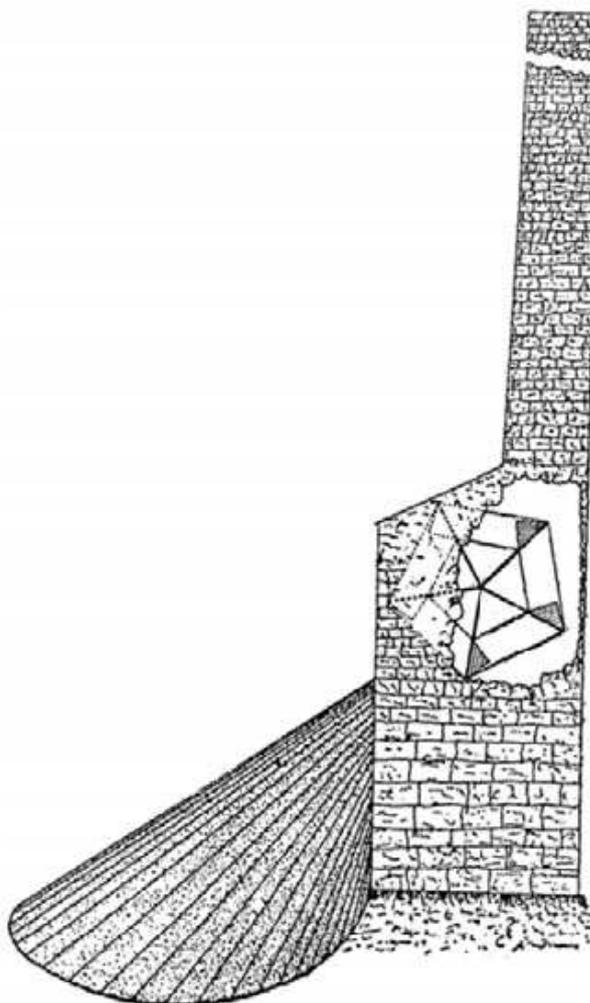


Figura 2.1: Projeto de motor solar proposto por Isidoro Cabanyes

Fonte: Cabanyes (1903)

Em 1926, o engenheiro e professor Bernard Dubos propôs à Academia Francesa de Ciências a construção de uma planta de geração de potência elétrica aero-solar na África do Norte. Conforme Günther (1931), esta instalação consistia de uma chaminé solar com um coletor na base de uma montanha e a chaminé fixa na encosta da mesma, com a extremidade da chaminé em sua parte mais alta, conforme pode ser observado na Figura 2.2 (a). O autor afirma que uma corrente de ar ascendente de 50 m/s podia ser alcançada na chaminé, cuja enorme quantidade de energia poderia ser extraída por turbinas eólicas. A Figura 2.2 (b) mostra ainda uma representação futurista apresentada pelo autor.

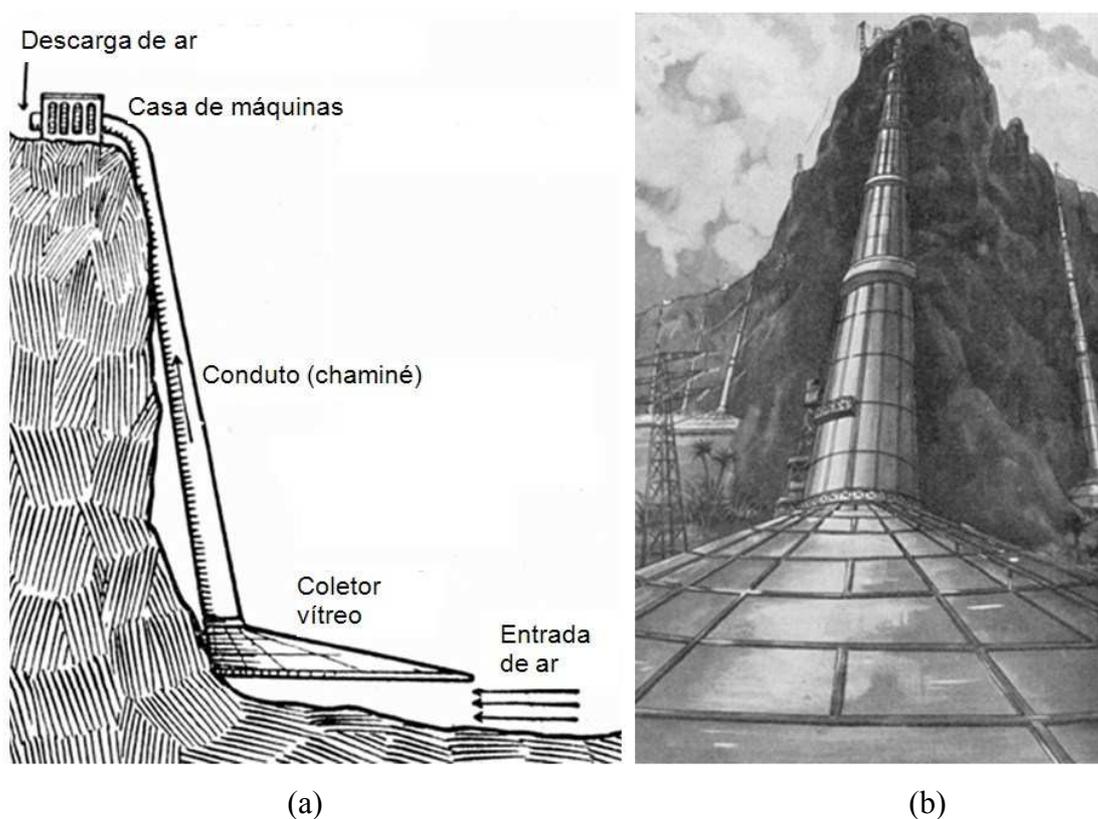


Figura 2.2: Chaminé solar proposta por Dubos (a) Esquema (b) Representação futurista  
Fonte: Günther (1931)

A Figura 2.3 mostra um simples experimento proposto por Dubos, conforme Günther (1931), que confirma o conceito. De acordo com Günther (1931), uma placa e uma lamparina representavam o deserto do Sahara e o calor solar, respectivamente. A pequena roda inserida no topo representava as turbinas eólicas. Quando a lamparina era posicionada sob a placa, o ar aquecido fluía concentricamente pela placa e era induzida até o centro, atingindo o tubo no centro do coletor. Conseqüentemente, o ar fluía pelo tubo em uma corrente ascendente até atingir as turbinas.

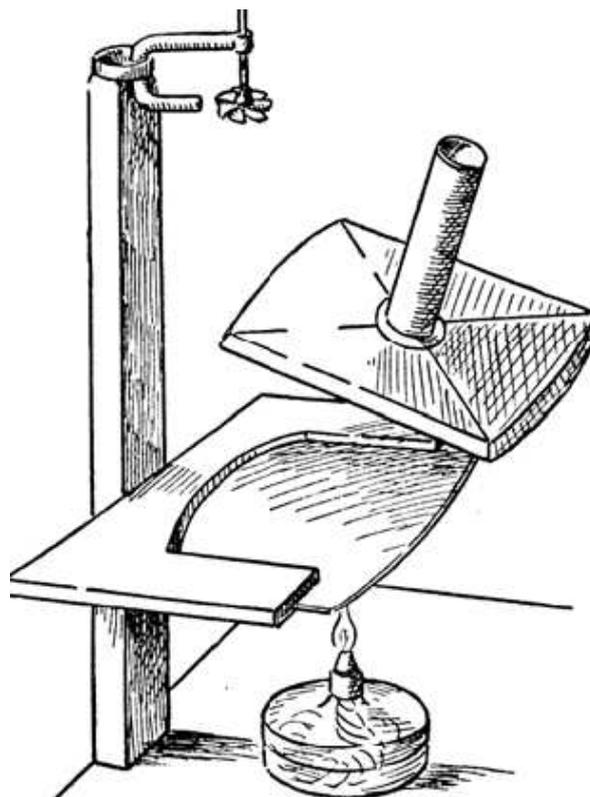


Figura 2.3: Experimento proposto por Dubos

Fonte: Günther (1931)

Após estes estudos, conforme Schlaich *et al.* (1983) e Haaf (1984), o governo alemão, sob a coordenação do engenheiro alemão Jörg Schlaich, financiou a construção de uma usina piloto em Manzanares (Espanha), que ficou em operação entre 1982 e 1989. A chaminé possuía uma altura de 195 metros com diâmetro de 10 metros e um coletor vítreo de 244 metros de diâmetro, obtendo um pico de potência na ordem de 50 kW. Durante sua operação, dados foram coletados com 180 sensores medindo temperaturas internas e externas, umidade e velocidade do vento em seu interior. Esta planta piloto operou por aproximadamente oito anos, sendo que o aporte financeiro de manutenção ocorreu apenas nos três primeiros anos, resultando na oxidação dos cabos que sustentavam a chaminé e que acabaram rompendo em uma tempestade em 1989, ocasionando sua queda.

A partir da implantação da usina piloto de Manzanares (Espanha), uma série de estudos foram conduzidos para prever a influência de características construtivas e geométricas, análises de viabilidade técnica e econômica em diversas regiões do mundo, confecção de modelos matemáticos e numéricos para prever a geração de potência, criação de modelos experimentais de menor escala e propostas de modelos inovadores utilizando este conceito, gerando uma vasta literatura a respeito desta tecnologia. Os principais trabalhos

nesta área são apresentados a seguir, organizados por foco de pesquisa e em ordem cronológica dentro de cada foco.

## 2.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E GEOMÉTRICAS

Preocupados em realizar uma análise mais detalhada dos modelos numéricos e analíticos envolvidos em chaminés solares, Bernardes *et al.* (2003) confeccionaram um modelo para estimar a potência líquida de uma chaminé solar, bem como examinar os efeitos de várias condições ambientais e dimensionais nesta geração. Entende-se por potência líquida a potência elétrica disponibilizada pela central geradora, já levando em conta a eficiência das turbinas geradoras. Os resultados do modelo matemático foram comparados com resultados experimentais para melhor prever as características de desempenho em chaminés solares comerciais para produção de energia em larga escala. Os resultados mostram que a altura da chaminé, o fator de queda de pressão na turbina, o diâmetro do coletor e as propriedades ópticas do material do coletor são os fatores mais importantes no projeto de uma chaminé solar. Verificaram que a máxima potência é obtida para um fator de queda de pressão na turbina igual a 0,97, conforme pode ser observado na Figura 2.4. Outros parâmetros como propriedades do solo, distância entre a cobertura do coletor e o solo, sistema de armazenamento de água e espessura do material da cobertura não apresentaram impactos significativos na potência máxima, apenas na inércia da potência gerada.

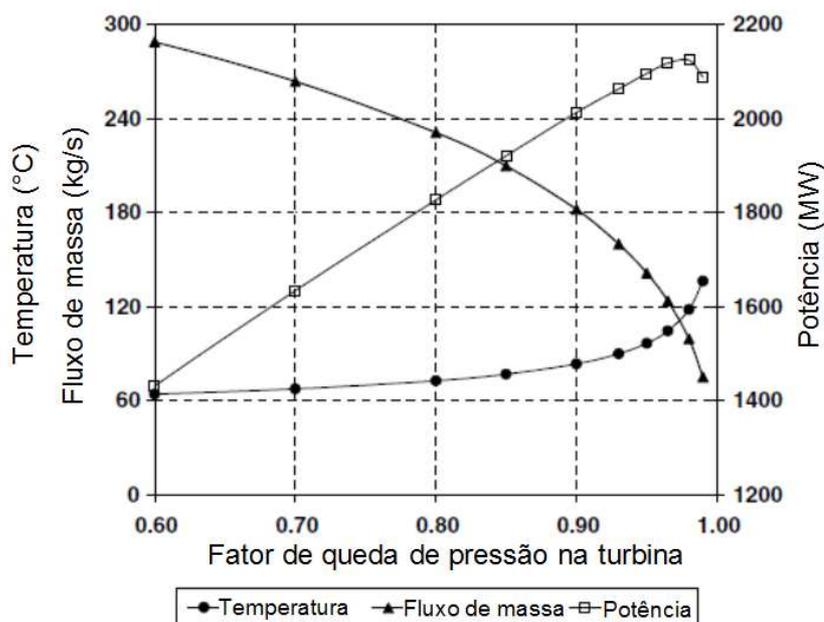


Figura 2.4: Variação de temperatura e Potência versus fator de queda de pressão na turbina

Fonte: Bernardes *et al.* (2003)

Uma configuração típica de uma planta de potência por chaminé solar possui uma turbina axial com fluxo radial escoando para o centro do coletor e passando por guias de entrada para direcionar o fluxo. A eficiência da turbina depende das fileiras de lâminas das turbinas e da perda de carga em seu difusor. Von Backström e Gannon (2004) apresentaram equações analíticas em termos do fluxo de massa, dos coeficientes de carga e dos graus de reação, para expressar a influência de cada um destes parâmetros na eficiência da turbina. Aplicações em plantas solares para geração em larga escala indicam um pico de eficiência na turbina de cerca de 90%, mas não necessariamente quando em operação a plena carga.

Estudo importante sobre perdas de carga secundárias em chaminés solares foi conduzido por Von Backström *et al.* (2006), tendo como objetivo identificar a magnitude destas perdas e sua influência na potência gerada, correlacionando-as com um valor equivalente na queda de pressão da turbina. Os resultados dos autores são mostrados na tabela 2.1, que incluem componentes e efeito de atmosfera não adiabática, fornecendo subsídios para modelos matemáticos mais precisos envolvendo perdas de carga.

Tabela 2.1 Efeitos de componentes e da atmosfera expressos em queda de pressão na turbina

<b>Componente</b>	<b>Perda de Carga (Pa)</b>	<b>% de queda de pressão na turbina</b>
Transição coletor-chaminé	5,0	0,5
Perda na turbina	100,0	10,0
Atrito com paredes	9,9	1,0
Suportes internos da chaminé	69,2	6,9
Saída	100,0	10,0
Atmosfera não adiabática	113,0	11,3

Fonte: Von Backström *et al.* (2006)

Denantes e Bilgen (2006) analisaram a aplicação de turbinas de contra rotação, em comparação com as turbinas simples. As turbinas de contra rotação são turbinas de dois ou mais estágios, com estatores intermediários para manter o fluxo mais linear nas pás. Segundo os autores, a aplicação deste tipo de turbina acarreta em menor turbulência em sua saída, e, apesar de uma potência um pouco menor devido ao seu baixo rendimento em relação às demais turbinas, elas necessitam de velocidades menores para iniciarem a geração de energia.

Como estas plantas de geração de potência trabalham normalmente a uma irradiação abaixo de  $800 \text{ W/m}^2$ , as turbinas de contra-rotação são as mais indicadas pelos autores.

Trabalho semelhante a este foi realizado posteriormente por Fluri e Von Backström (2008). Porém, ao contrário dos autores citados no trabalho anterior, evidenciou-se que a eficiência das turbinas com as guias intermediárias é maior que as turbinas simples, porém com velocidades menores e sem efeitos de turbulência após a turbina.

Com relação à perda de carga em uma turbina aplicada a chaminés solares, Nizetic e Klarin (2009) analisaram o ciclo termodinâmico de uma usina que opera por este princípio. Após calcular a eficiência total do ciclo, que compreende a eficiência da chaminé, do coletor, da turbina e da transmissão, chegaram a um valor de queda de pressão na faixa de 0,8 a 0,9, conforme mostra a Figura 2.5. Este fator de queda de pressão representa a fração utilizada pela turbina para geração de potência a partir de um diferencial de pressão produzido pela chaminé. Ao contrário de outros autores que realizaram análise semelhante, envolvendo altura e diferença de temperatura, estes demonstraram que a queda de pressão da turbina está relacionada com a velocidade na entrada e com a razão entre a perda por convecção ( $\alpha$ ) e a perda por absorção no solo ( $\beta$ ), denominada pelos autores como  $\alpha/\beta$ , conforme mostra a Figura 2.6. Ainda, levaram em consideração que o ganho de temperatura não é constante com a modificação de velocidade, simplificação esta feita por outros autores em momentos anteriores, contrária a realidade.

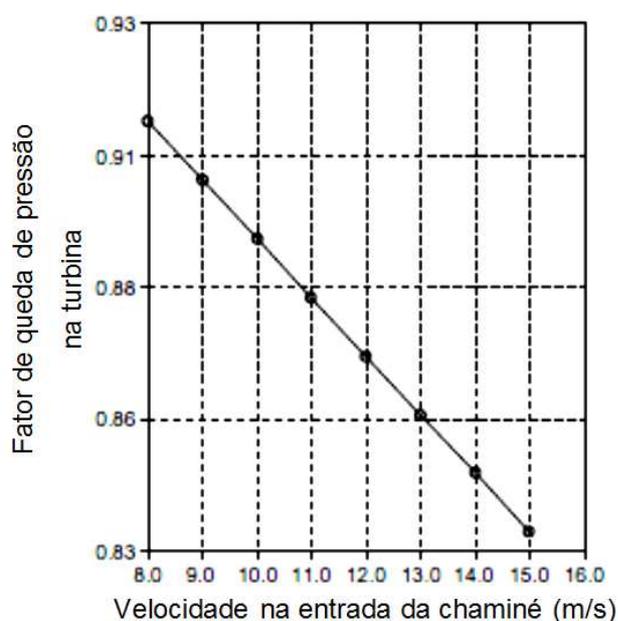


Figura 2.5: Relação entre o fator de queda de pressão na turbina e a velocidade de entrada;  
Fonte: Nizetic e Klarin (2009)

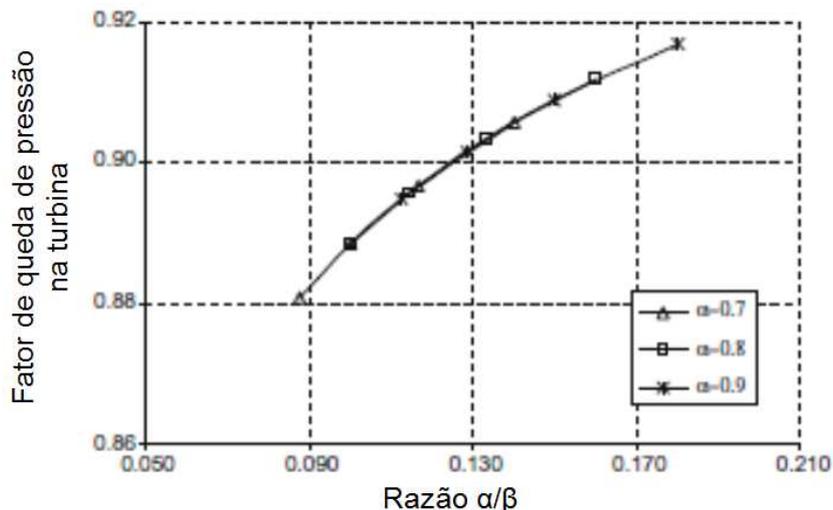


Figura 2.6: Relação entre o fator de queda de pressão na turbina e a razão entre a perda por convecção ( $\alpha$ ) e absorção do solo ( $\beta$ ).

Fonte: Nizetic e Klarin (2009)

Uma característica geométrica que merece atenção é a influência da altura da chaminé em uma usina deste tipo. Sabendo que o princípio de operação destas usinas é o movimento do ar devido ao empuxo gerado pela diferença de temperatura do ar aquecido com o ar atmosférico em diferentes altitudes, Zhou *et al.* (2009) investigaram a influência da altura da chaminé na velocidade do ar na seção da mesma e a influência da altura na potência gerada. Isto por que, a partir de determinada altura, e dependendo das características construtivas de cada tipo de chaminé, pode ocorrer um empuxo negativo, devido ao resfriamento do ar no interior da chaminé. Após estas análises, os autores realizaram simulações para diferentes pressões atmosféricas na localidade da planta, e chegaram a relações importantes sobre a altura da chaminé versus a pressão atmosférica, com valores de pressão atmosférica variando de 90 kPa a 102 kPa (Fig. 2.7), obtendo relações entre a potência gerada e a altura da chaminé (Fig. 2.8). Apenas para ilustrar, tomando como referência dados técnicos da usina de Manzanares, na Espanha, uma potência máxima de 102,2 kW é gerada para uma altura de chaminé de 615m. Utilizando uma chaminé de 778,7 m, a potência máxima gerada é de 92,3 kW, provando assim que existe uma altura ótima tanto para a convecção como para a geração de energia.

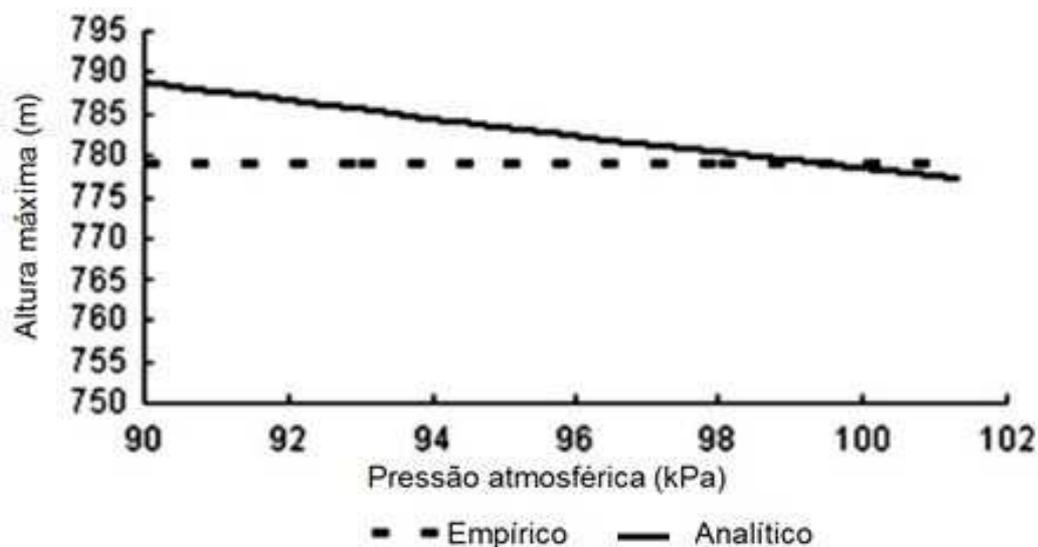


Figura 2.7: Relação entre altura máxima e pressão atmosférica

Fonte: Zhou *et al.* (2009)

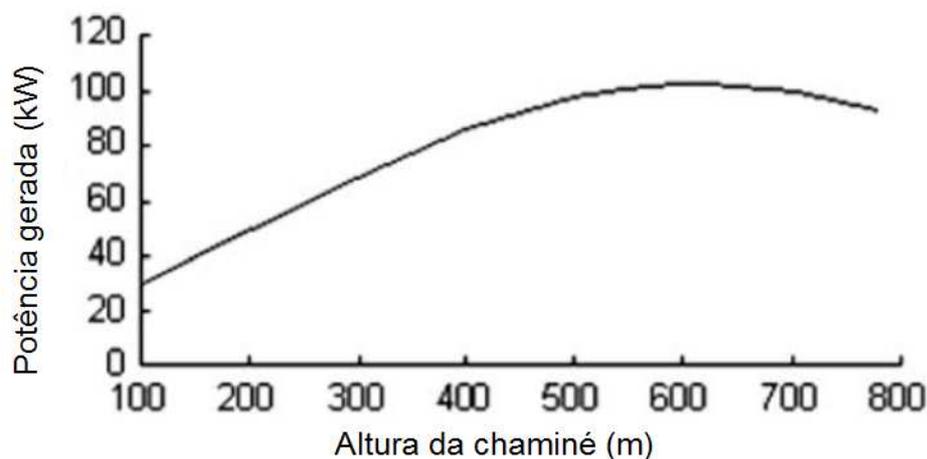


Figura 2.8: Relação entre potência gerada e a altura da chaminé

Fonte: Zhou *et al.* (2009)

De maneira a conseguir uma estrutura mais estável, de fácil construção e a um custo menor, Panse *et al.* (2011) sugerem um modelo de chaminé solar inclinada, construída na encosta de uma superfície geográfica inclinada, tal como uma montanha ou serra. Um modelo matemático foi proposto considerando um balanço total de energia, considerando todas as perdas e a influência das dimensões da planta e dos materiais utilizados. Apesar de terem proposto o modelo matemático, nenhuma simulação foi desenvolvida pelos autores.

Cao *et al.* (2011) também propuseram o estudo de chaminés solares inclinadas, para aplicação em Lanzhou, no noroeste da China. A planta possui uma altura de 252,2 m e um raio de coletor de 607 m, produzindo 5 MW de eletricidade como média mensal por ano.

### 2.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Vários estudos foram realizados sobre a viabilidade técnica e econômica para a implantação de usinas elétricas utilizando o conceito de chaminés solares em algumas regiões do mundo, porém nenhuma ainda focada no Brasil e em suas regiões. Uma análise deste tipo requer um estudo sobre o potencial elétrico de cada região tomando como base as condições climáticas da mesma, como histórico de temperaturas, umidade relativa, radiação direta e difusa ao longo dos meses, etc.

Um sistema de chaminé solar para a produção de energia em grandes latitudes foi projetado e avaliado por Bilgen e Rheault (2005). Um modelo matemático utilizando a plataforma computacional MATLAB foi desenvolvido baseado em registros meteorológicos e em ciclos termodinâmicos. O desempenho térmico de uma produção nominal de 5 MW em três localidades no Canadá foi estudada, inclusive em regiões montanhosas que poderiam ter suas encostas utilizadas para iniciar a coleta de ar aquecido. Os resultados foram satisfatórios, mostrando que as plantas nestas regiões de alta latitude podem gerar até 85% de energia do que o gerado em regiões mais ao sul, próximo do mediterrâneo, e a eficiência comprometida pode ser de apenas 0,5% em comparação com as demais em uma latitude mais favorável, tomando como base a média anual.

Com o intuito de verificar o potencial da aplicação de chaminés solares em regiões rurais de países em desenvolvimento, Onyango e Ochieng (2006) realizaram um estudo sobre chaminés solares de pequeno porte para aplicações nestas regiões. Os autores verificaram que a potência mínima gerada por uma chaminé solar de dimensões específicas exibe um valor mínimo de 2.9 para a razão entre a diferença entre a temperatura do coletor e da turbina e a diferença entre a temperatura da massa de ar abaixo do coletor e do coletor. Com este valor mínimo indicado pelos autores, ocorre uma geração inicial de potência na ordem de 1 kW em chaminés de pequeno porte, ou seja, de comprimento 150 m e raio da chaminé de 1,5 m. Apesar destes autores não indicarem o diâmetro do coletor, e da potência mencionada ser pequena, eles verificaram que a produção de energia aumenta exponencialmente com a razão de acréscimo de temperatura provido no coletor, conforme pode ser visualizado na Figura 2.9. Esta chaminé, com estas dimensões e com uma razão entre a diferença entre a temperatura do coletor e da turbina e a diferença entre a temperatura da massa de ar abaixo do coletor e do coletor igual a 15 atenderia uma área rural de aproximadamente 50 eletrodomésticos de padrão rural. Conforme este fator aumenta, a potência gerada aumenta exponencialmente, conforme mostra a Figura 2.9.

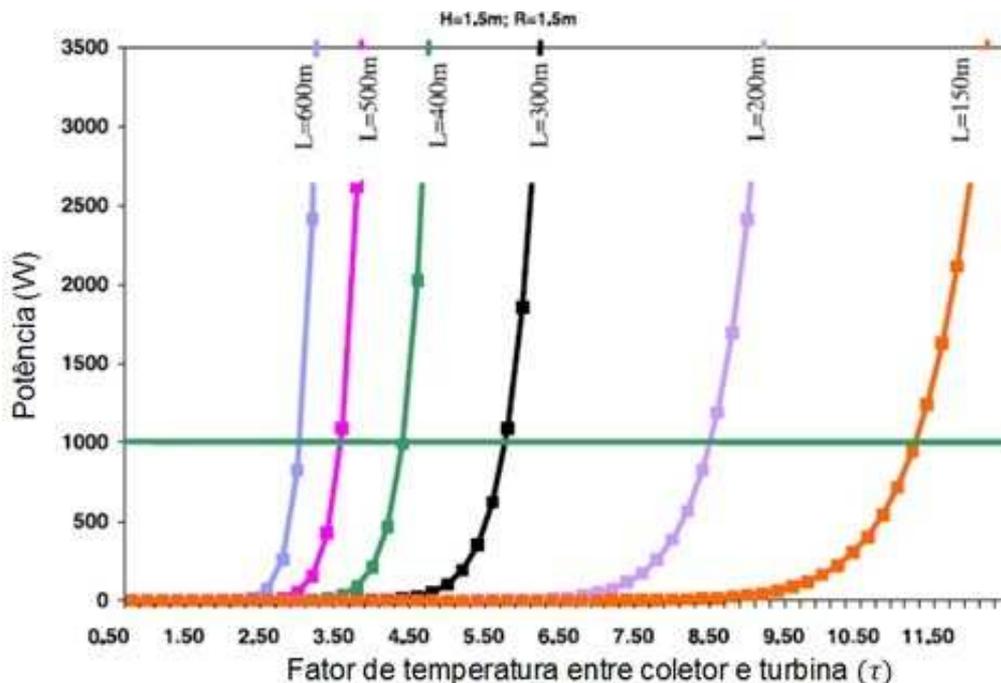


Figura 2.9: Relação entre potência, altura e fator de temperatura entre coletor e turbina  
 Fonte: Zhou *et al.* (2009)

A grande proporção de energia elétrica importada da África do Sul para Botsuana, a localização geográfica favorável deste local e a distribuição da população estimulou Ketlogetswe *et al.* (2008) a estudarem a aplicação de energias renováveis como alternativa a energia importada. O estudo conduzido por estes autores descreve uma sistemática experimental em um pequeno sistema de chaminé solar, e a atenção foi focada para as medidas de velocidade, temperatura e radiação solar, e os resultados podem ser observados na Figura 2.10. Apesar dos relatos sobre o comportamento da temperatura e da radiação solar durante o período solar de cada dia de teste, não ficou claro qual a conclusão dos autores sobre a aplicação deste modelo em Botsuana. O enfoque dado pelos autores foi da inércia térmica provida pelo solo, que funciona como um regenerador, absorvendo energia durante o período de radiação e liberando esta energia quando a radiação começa a cessar.

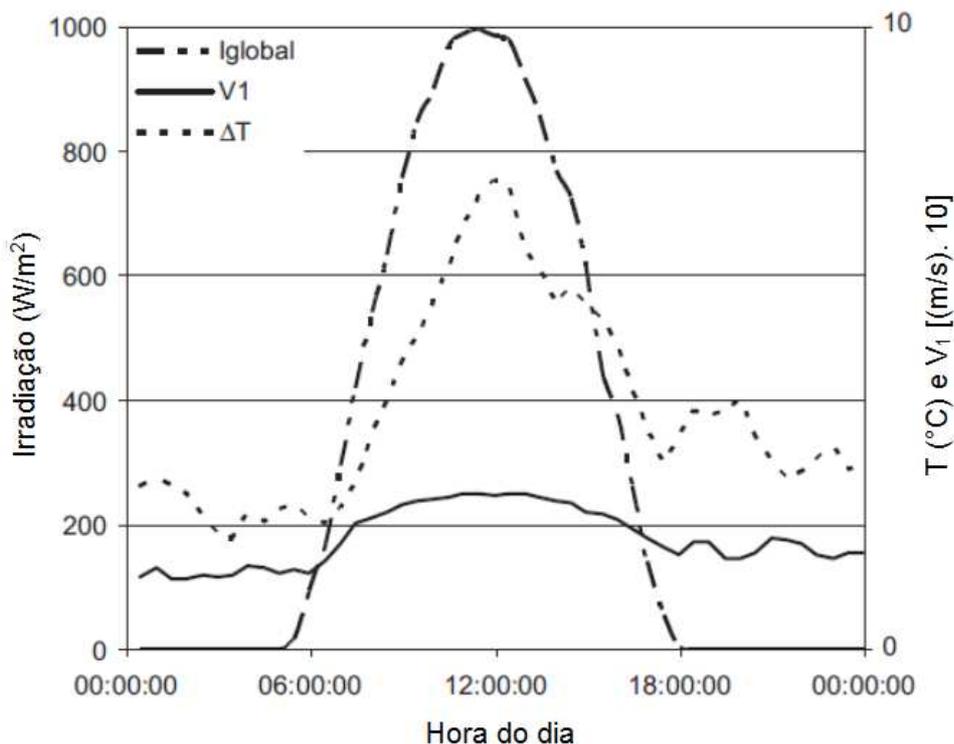


Figura 2.10: Relação entre a irradiação solar, acréscimo de temperatura do ar no coletor e velocidade do ar na turbina, em 30 de outubro de 2005 em Botswana.

Fonte: Ketlogetswe *et al.* (2008)

Apesar do interesse em desidratar alimentos ao invés da preocupação com a produção de energia, Ferreira *et al.* (2008) realizaram uma análise da viabilidade técnica de uma chaminé solar para este fim. Foi utilizado um protótipo (Figura 2.11) para monitorar a velocidade e temperatura do fluxo de ar em função da radiação solar incidente, possuindo 12,3 m de altura e um diâmetro do coletor de 25 m. A desidratação de alimentos, baseado em estudos teóricos e experimentais que foram conduzidos pelos autores asseguram a viabilidade técnica desta operação. Para o protótipo construído, em termos de média anual, o mesmo gera um aumento da temperatura do ar em torno de  $13 \pm 1^\circ\text{C}$ , um fluxo mássico em torno de  $1,4 \pm 0,8 \text{ kg/s}$ , o que permite uma capacidade de desidratar aproximadamente 440 kg de alimento em dez dias de operação (Figura 2.12).

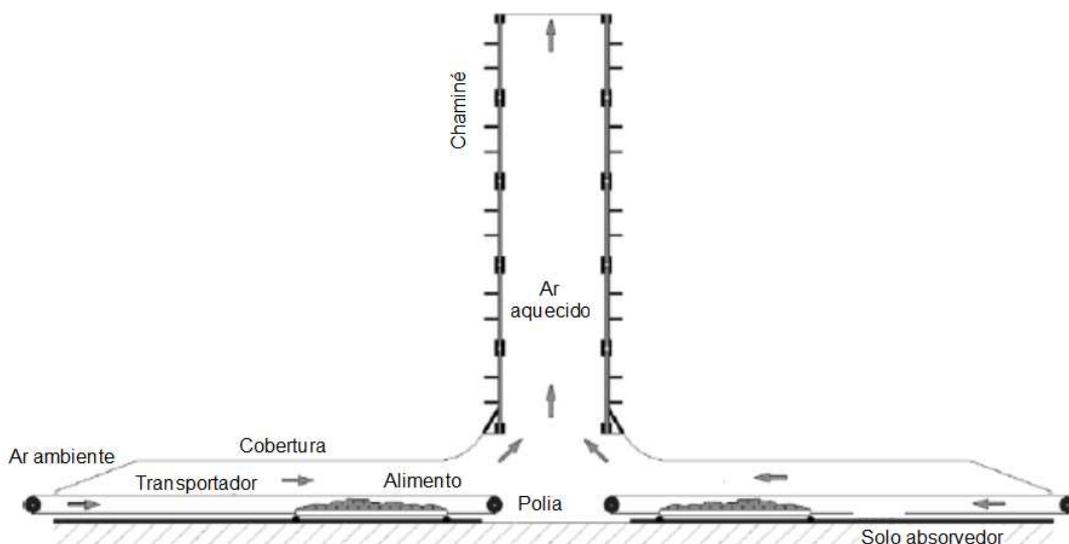


Figura 2.11: Chaminé solar para desidratação de alimento.

Fonte: Ferreira *et al.* (2008)

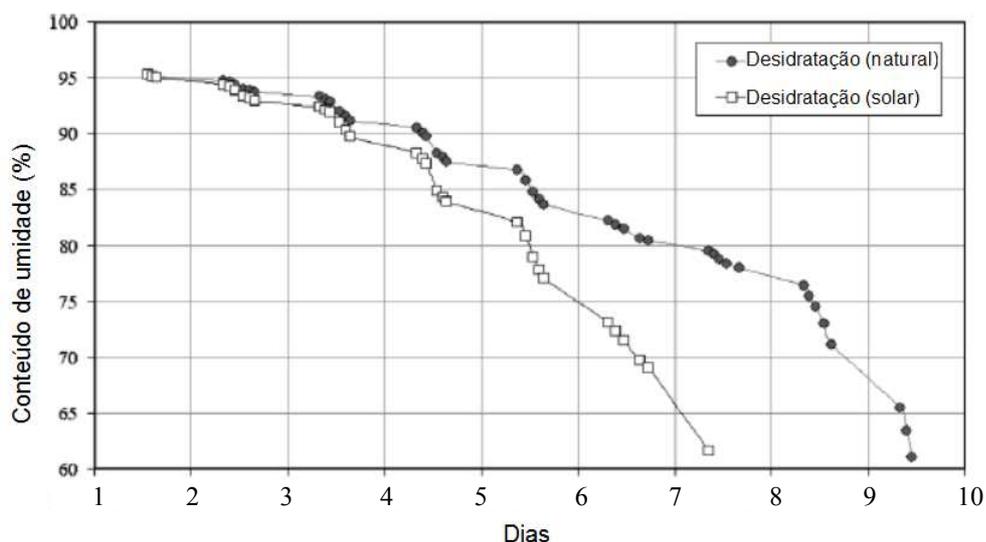


Figura 2.12: Curva de desidratação de tomates utilizando apenas a luz solar e a chaminé solar.

Fonte: Ferreira *et al.* (2008)

Preocupados com a situação energética da região Mediterrânea, Nizetic *et al.* (2008) realizaram um estudo técnico e econômico para a implementação em algumas regiões do Mediterrâneo localizadas tanto no continente como em algumas ilhas da região. O objeto de estudo foi uma chaminé solar de 550 metros de altura com uma cobertura de 1250 m de diâmetro. Chegou-se a um valor médio calculado de produção de energia de 5,0 a 6,0 GWh/ano, em condições realistas, conforme pode ser observado nas Figuras 2.13 e 2.14. Um estudo de viabilidade econômica foi realizado, e chegou-se a conclusão que o custo da energia por este método é mais elevado que por outras fontes de energia, tomando como prazo de

amortização de 30 anos. Porém, apesar deste custo ser elevado em curto prazo, ele se torna mais atraente em longo prazo, pois segundo a análise feita pelos autores, este tipo de usina possui uma vida útil elevada, acima de 60 anos, em contraste com uma planta fóssil que possui vida útil de aproximadamente 20 anos.

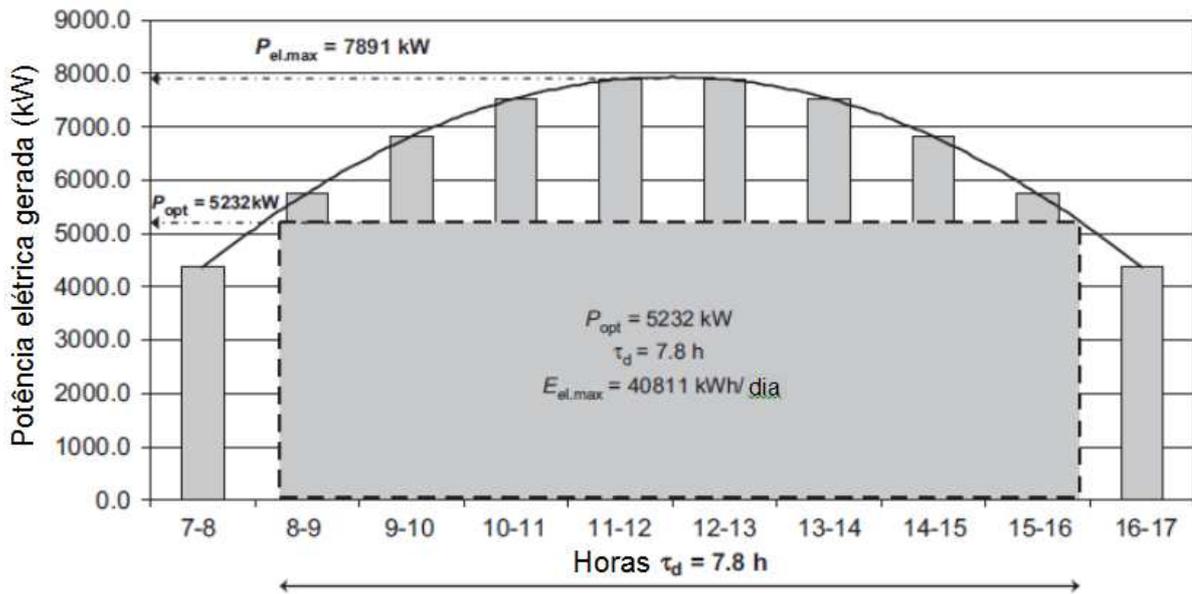


Figura 2.13: Média diária da potência elétrica gerada.

Fonte: Nizetic *et al.* (2008)

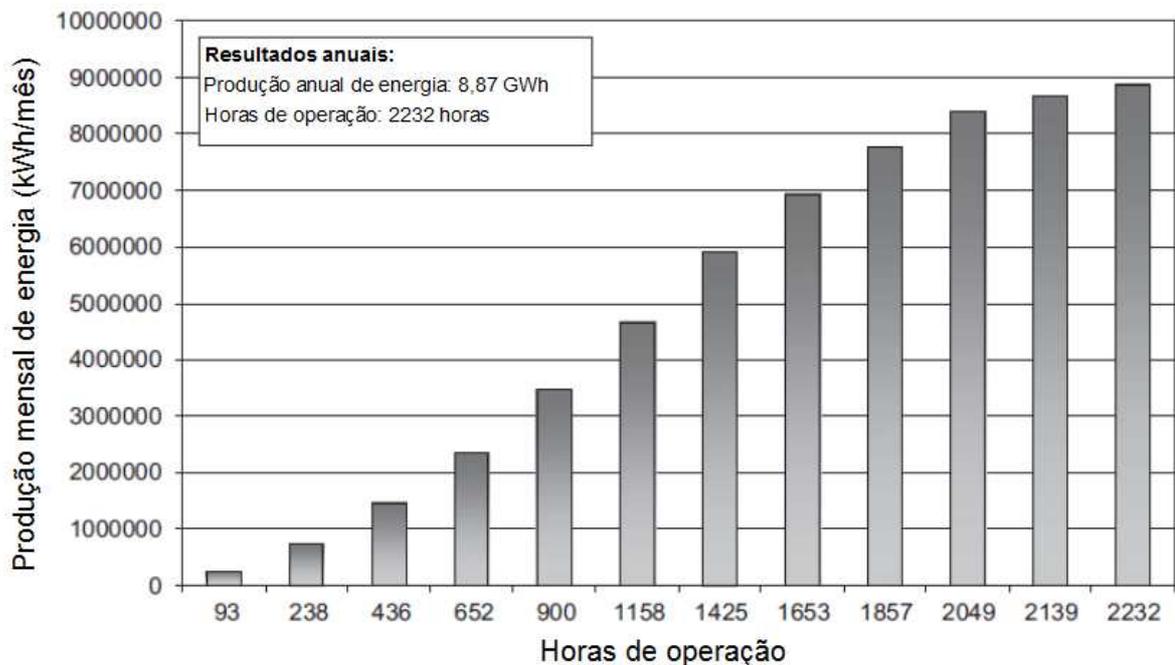


Figura 2.14: Simulação da potência gerada durante um ano.

Fonte: Nizetic *et al.* (2008)

Em relação ao custo de implantação de uma chaminé solar, Fluri *et al.* (2009) apresentaram uma investigação mais completa e detalhada sobre os parâmetros envolvidos. Foram realizadas análises de custo baseadas em plantas de escalas semelhantes aos outros trabalhos apresentados nesta revisão, porém consideraram ainda o impacto dos créditos de carbono pela utilização de energia limpa. A conclusão é de que os custos iniciais apresentados por outros trabalhos foram subestimados, apesar do crédito de carbono reduzir um pouco os custos durante a operação. Desta forma os resultados obtidos por estes autores foram que o custo da energia elétrica proveniente desta fonte é aproximadamente 2,7 vezes maior que o previsto por outros autores, ou seja, €0,27/kWh contra €0,1/kWh. Estas discrepâncias são devidas tanto ao custo de construção da planta como também da potência prevista a ser gerada anualmente ser menor que o previsto. Isto sugere que as investigações anteriores são muito otimistas e que a implantação deste tipo de planta pode ser arriscada. Vale ressaltar que a cotação do euro na abordagem do autor foi de €1,00 = US\$1,20.

O estudo também mostra que os créditos de carbono, incentivos fiscais devido ao uso de energias limpas, reduzem significativamente os custos da energia por este método, e foi um parâmetro que não foi considerado em estudos anteriores. A Figura 2.15 mostra a distribuição dos custos em uma central deste tipo para aplicação na Europa.

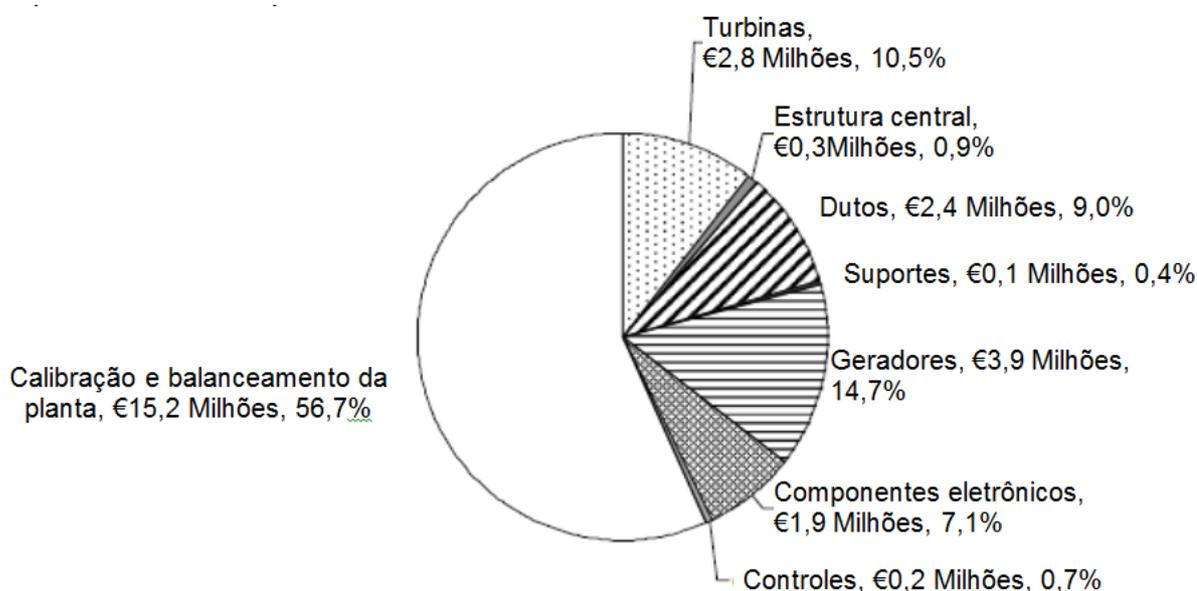


Figura 2.15: Divisão dos custos de implantação de uma chaminé solar na Europa.

Fonte: Fluri *et al.* (2009)

Preocupado em avaliar o potencial energético da União dos Emirados Árabes, Hamdam (2011) realizou uma análise termodinâmica simplificada, em conjunto com a equação de Bernoulli e com a estática dos fluidos, para encontrar a geração de potência em

alguns países da região com o auxílio do software EES<sup>®</sup>. Os resultados indicam uma potência mínima de geração na ordem de 8 MW para uma planta com chaminé de 500 m de altura e um coletor de 1000 m de diâmetro.

De maneira a avaliar o desempenho de chaminés solares em algumas regiões do Irã, Sangi (2011) confeccionou um modelo matemático baseado em um balanço energético para estimar a potência de saída, assim como examinar a influência de várias condições ambientais e geométricas nesta geração de potência. Uma chaminé solar com 350 m de altura com um coletor de 1000 m de diâmetro foi considerado pelo autor capaz de gerar uma média mensal de 1 a 2 MW de potência durante todo o ano.

Para o Brasil, nenhum trabalho foi realizado para a obtenção do potencial energético em todo o seu território. Porém, Bobek (2010) apresentou um estudo econômico da implantação de chaminés solares no norte do Brasil para uma planta de 15 MW de potência nominal. Neste estudo, Bobek (2010) realizou um levantamento do retorno financeiro que a venda de créditos de carbono propicia ao empreendimento, baseado em resoluções do Ministério de Ciências e Tecnologia – MCT. Este retorno é baseado na multiplicação da produção anual de energia em MWh/ano por um fator de emissão determinado pelo MCT como 0,855 tonCO<sub>2</sub>/MWh. O resultado pode ser interpretado como a redução de emissão de dióxido de carbono na atmosfera. Deste valor, são subtraídos 2% para a UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change* – como contribuição para este órgão para promover a diminuição de emissão dos gases de efeito estufa. Os 98% restantes retornam como receita anual ao preço de 8 €/tonCO<sub>2</sub>.

## 2.4 MODELOS MATEMÁTICOS E NUMÉRICOS

Ninic (2006) desenvolveu um extenso estudo sobre a exergia (disponibilidade) em usinas que utilizam chaminés solares. A dependência do ganho de calor do ar dentro do coletor, umidade do ar e pressão atmosférica em função da altura foi calculada. A influência da altura das chaminés no trabalho produzido pela turbina foi determinada, juntamente com o vórtice gerado pela mesma.

No intuito de melhor investigar o desempenho de chaminés solares para geração de energia em larga escala, Pretorius e Kröger (2006) analisaram o efeito de uma equação recentemente desenvolvida para o coeficiente de transferência de calor por convecção, tornando o cálculo do coeficiente de queda de pressão na entrada da turbina mais preciso,

assim como o ganho de calor do coletor. A influência de vários materiais no solo foi investigada. O estudo concluiu que a equação 2.2 proposta por Pretorius e Kröger (2006) retorna valores de potência anual gerada 11,7% menores que de outros autores na literatura, que, conforme Pretorius e Kröger (2006), superestimavam a potência gerada pela planta. Utilizando um sistema vítreo de melhor qualidade, os valores de potência em suas simulações aumentam em 3,4%.

A equação 2.1, anteriormente utilizada pela literatura para definir o coeficiente de transferência de calor do coletor para o ar ambiente externo é dada pela correlação de McAdams (Pretorius e Kroger 2006 apud McAdams 1954):

$$h_{ext,1} = 5,7 + 3,8 \cdot w_{vento} \quad (2.1)$$

Porém, novos estudos demonstrados por Pretorius e Kröger (2006) revelam que correlações que empregam convecção livre e forçada combinadas para uma placa plana horizontal aquecida torna o resultado mais confiável para o coeficiente de convecção para o lado externo do coletor (Eq. 2.2),

$$h_{ext,2} = \frac{0,2106 + 0,0026 \cdot w_{vento} \cdot \left( \frac{\rho \cdot T_m}{\mu \cdot g \cdot \Delta T} \right)^{\frac{1}{3}}}{\frac{\mu \cdot T_m}{(g \cdot \Delta T \cdot c_p \cdot k^2 \cdot \rho^2)^{\frac{1}{3}}}} \quad (2.2)$$

e para o lado interno do coletor (Eq. 2.3),

$$h_{int,1} = \frac{\left( \frac{f}{8} \right) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left( \frac{f}{8} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \cdot \left( \frac{k}{D_h} \right) \quad (2.3)$$

Salienta-se que o coeficiente de convecção na parte interna do coletor é determinado utilizando hipótese de escoamento interno completamente desenvolvido. As novas correlações promovem a diferença na potência de saída conforme pode ser observado na Figura 2.16. As simulações de Pretorius e Kröger (2006) foram realizadas em Sishen, África do Sul, o que explica as curvas maiores para o mês de dezembro e menores para o mês de junho, verão e inverno no hemisfério sul, respectivamente.

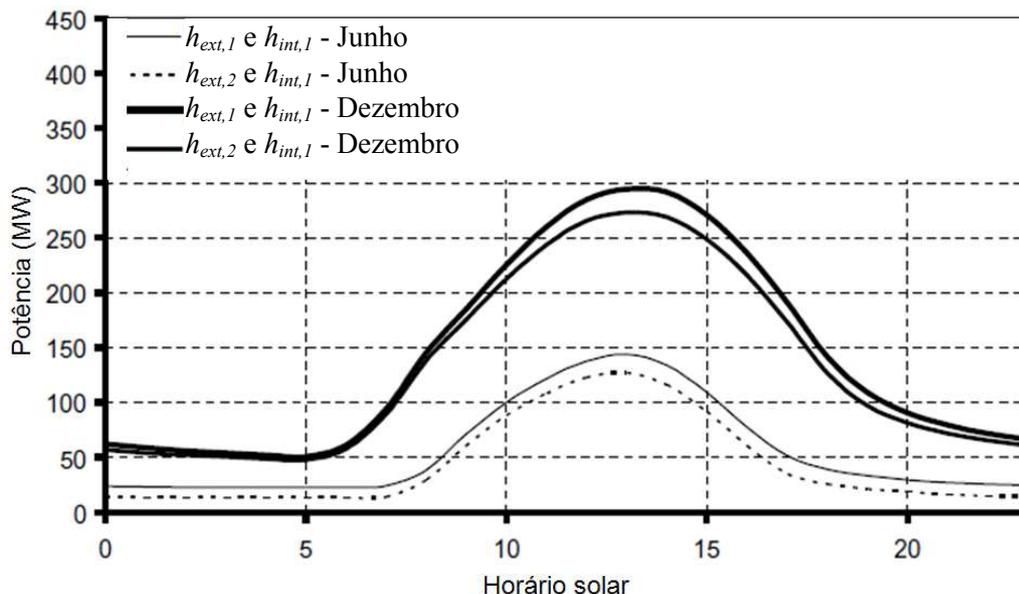


Figura 2.16: Efeito das correlações de convecção na potência gerada em simulações.

Fonte: Pretorius e Kröger (2006)

Pretorius e Kröger (2006) também estudaram o impacto da qualidade do material vítreo na geração de potência, para os meses de junho e dezembro, e o resultado pode ser visualizado na Figura 2.17. É possível reparar na Figura 2.17, principalmente para o inverno, que vidros de baixa qualidade produzem maior potência nas manhãs (7h às 14h, aproximadamente). Isto é explicado pelo fato de que vidros de baixa qualidade possuem menor transparência e maior absorção de calor, o que aumenta a temperatura do coletor.

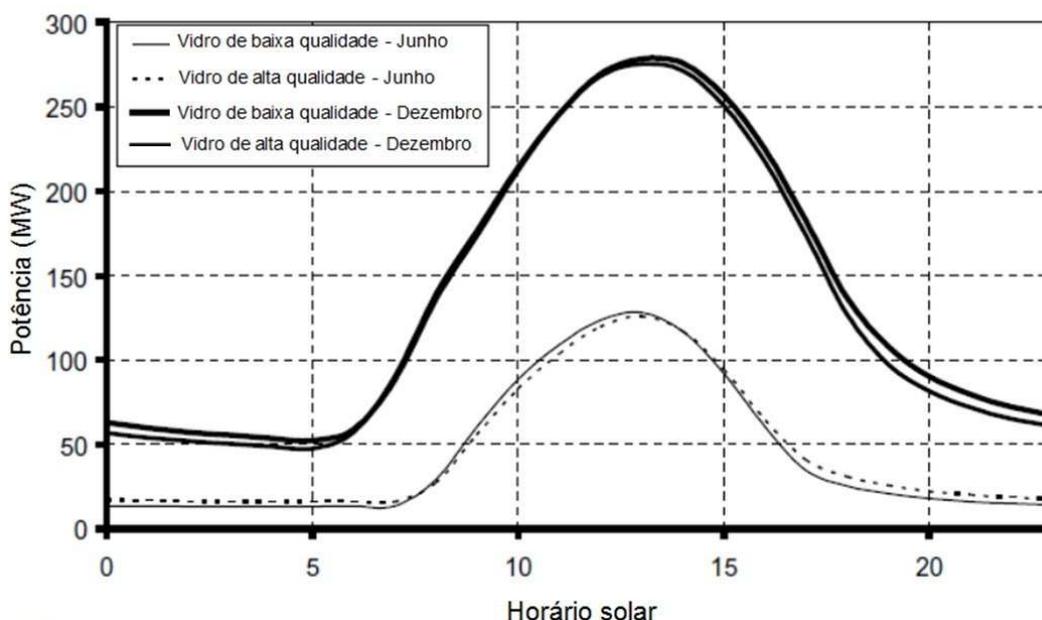


Figura 2.17: Efeito da qualidade do material da cobertura na potência gerada.

Fonte: Pretorius e Kröger (2006)

Quanto ao material utilizado no solo, Pretorius e Kröger (2006) ainda realizaram estudos utilizando granito, calcário e arenito. As propriedades dos materiais utilizados podem ser visualizadas na tabela 2.2.

Tabela 2.2 Efeitos de componentes e da atmosfera expressos em queda de pressão na turbina

Tipo de solo	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kgK)	Condutividade térmica (W/mK)	Coef. de penetração de calor (Ws <sup>1/2</sup> /Km <sup>2</sup> )
Calcário	2500	900	1,26	1684
Arenito	2160	710	1,83	1675
Granito	2640	820	1,73	1935

Fonte: Pretorius e Kröger (2006)

Para a geração de potência, no mesmo período citado, tiveram os seguintes resultados, que podem ser visualizados na Figura 2.18. Nota-se que, devido ao fato do calcário e do arenito possuírem coeficientes de penetração de calor muito semelhantes, os mesmos apresentam resultados praticamente iguais e superiores ao solo tipo granito durante o dia e inferiores ao granito durante à noite.

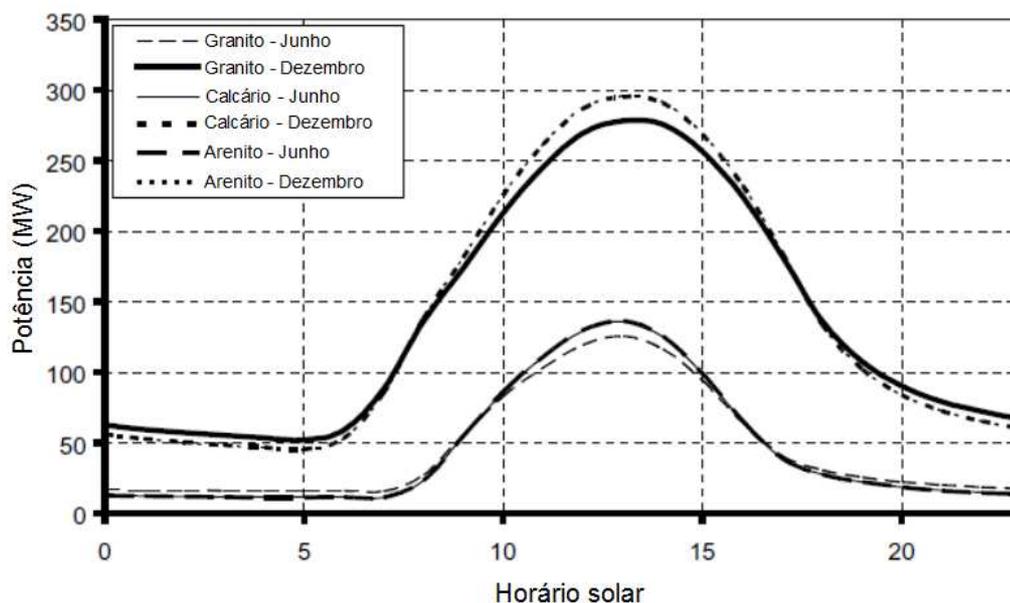


Figura 2.18: Efeito do material absorvedor no solo na potência gerada.

Fonte: Pretorius e Kröger (2006)

Von Backström e Fluri (2006) investigaram analiticamente a validade e aplicabilidade da hipótese de que a razão ótima de queda de pressão na turbina em relação à pressão potencial é 2/3. Os autores mostraram que a hipótese de pressão potencial constante pode levar a uma subestimação do desempenho de uma chaminé solar, quando comparada à análise

elaborada e apresentada pelos mesmos. A conclusão mais importante no trabalho deles é que a máxima potência é obtida a uma vazão mássica menor e a uma queda de pressão maior na turbina, do que prevê os demais modelos na literatura que assumem uma pressão potencial constante.

Como forma de determinar variáveis adimensionais para guiar o estudo experimental do escoamento em chaminés solares, Koonsrisuk e Chitsomboon (2007) utilizaram a dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para analisar o escoamento de dois fluidos de trabalho diferentes em chaminés solares de pequena escala: água e ar como fluidos de trabalho. O estudo mostra que o ar é o melhor fluido de trabalho em uma chaminé solar, quando comparado com a água, mesmo que a chaminé possua dimensões apropriadas para o uso desta substância. Os resultados obtidos pelas análises com CFD mostram que os modelos são dinamicamente similares aos protótipos sugeridos pelas variáveis adimensionais. Os autores analisaram ainda o comportamento da velocidade na junção entre o coletor e a chaminé, mas não analisaram, assim como nenhum outro autor, a influência do rotacional após o fluido deixar a turbina.

Visando uma análise da unidade de conversão de potência no que diz respeito a sua orientação e local de instalação, Fluri e Von Backström (2008) realizaram simulações para três configurações diferentes, entre elas uma única turbina na vertical (Figura 2.19a), outra com múltiplas turbinas na vertical (Figura 2.19b) e outra com múltiplas turbinas na horizontal (Figura 2.19c). A turbina simples na vertical possui maiores vantagens do que as outras configurações no que diz respeito à eficiência e pico de energia, pois certas perdas de mecanismos não estão presentes. Porém, esta configuração gera um acréscimo de custo no acionamento e transmissão, devido ao alto torque presente.

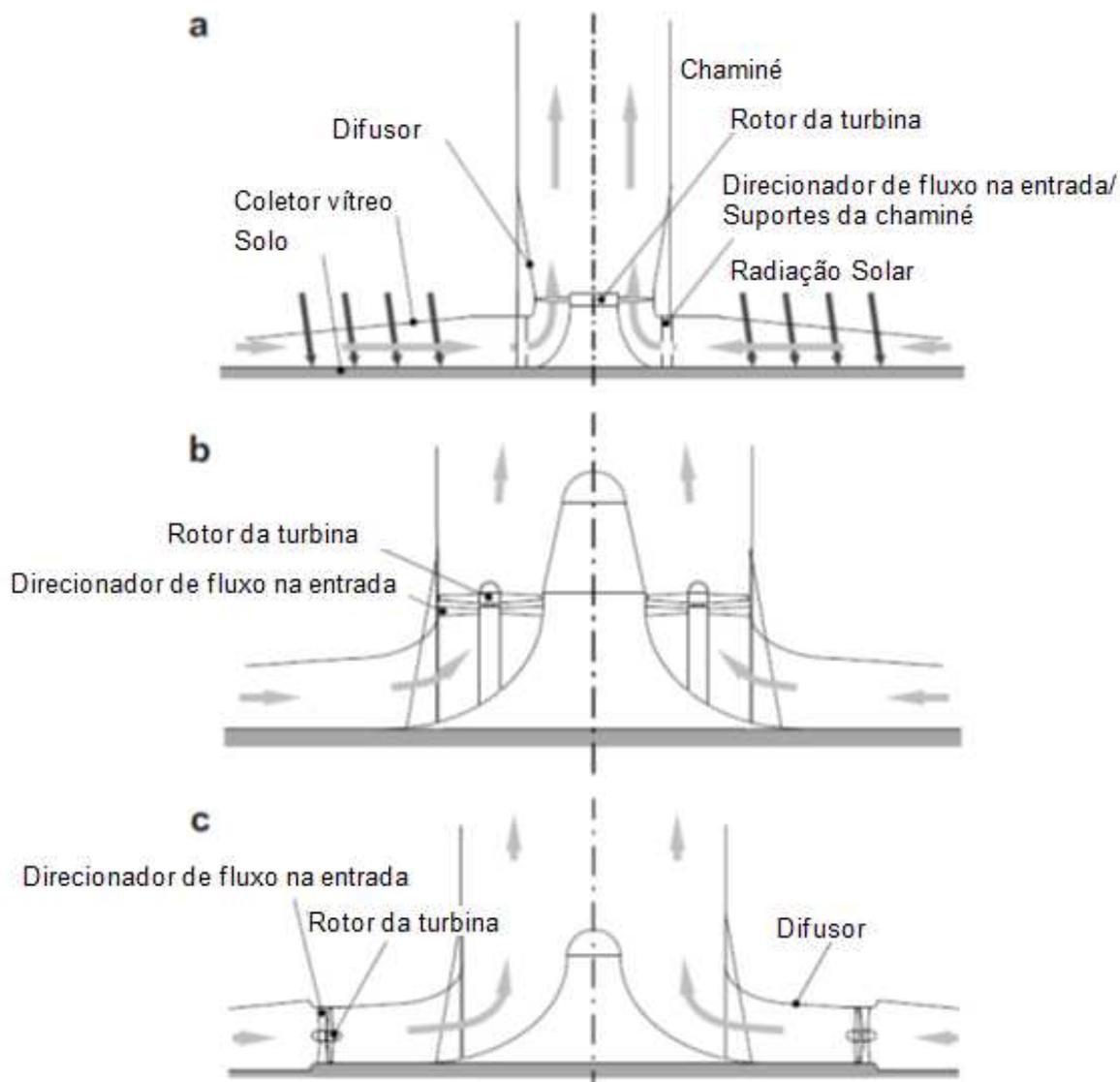


Figura 2.19: Diferentes posicionamentos das turbinas: (a) única turbina na vertical, (b) múltiplas turbinas na vertical e (c) múltiplas turbinas na horizontal.

Fonte: Fluri e Von Backström (2008)

Simulações numéricas foram realizadas por Tingzhen *et al.* (2008) em plantas de geração de potência através de chaminés solares acopladas a turbinas. Todo o sistema foi dividido em três regiões: o coletor, a chaminé e a turbina, e os modelos matemáticos e de fluxo foram ajustados para estas regiões. Os autores utilizaram o protótipo espanhol de Manzanares como exemplo prático, e os resultados de simulações com turbinas de três pás alcançaram uma potência de saída um pouco acima de 50 kW. Além disso, o efeito da velocidade angular da turbina nos parâmetros de saída foi analisado e comparado com os resultados de outros autores, mostrando a validade do modelo numérico apresentado. Além deste estudo, os autores projetaram e simularam uma planta de geração de energia através de chaminés solares com uma turbina de 5 pás, com uma potência de saída de 10MW e eficiência

acima de 50%, se tornando referência no projeto de plantas de geração de potência em larga escala utilizando chaminés solares.

Bernardes *et al.* (2009) analisaram as diferenças entre os modelos matemáticos de Bernardes (2003) com aqueles utilizados por Pretorius e Kröger (2006), no que concerne o cálculo dos coeficiente de transferência de calor por convecção. As equações para a taxa de transferência de calor por convecção natural e forçada foram avaliadas através de simulações, e do desempenho computacional. Eles chegaram à conclusão que os coeficientes de convecção apresentados por Pretorius e Kröger (2006) eram superiores aos apresentados por Bernardes *et al.* (2003). Isto resulta em uma perda um pouco maior de calor para o ambiente, e uma taxa de transferência de calor menor para o fluxo de ar no coletor. Em contrapartida, o modelo de Bernardes *et al.* (2003) provê um menor coeficiente de transferência de calor na parte externa, o que aumenta os valores de transferência de calor para o fluxo de ar, pois promove uma perda menor de calor para o ambiente. Ambos os modelos geraram perfis de temperatura similares. A Figura 2.20 mostra como a geração de potência pode ser alterada pela variação de diversos parâmetros, tais como altura da chaminé, área do coletor, propriedades ópticas da cobertura e fator de perda de carga na turbina.

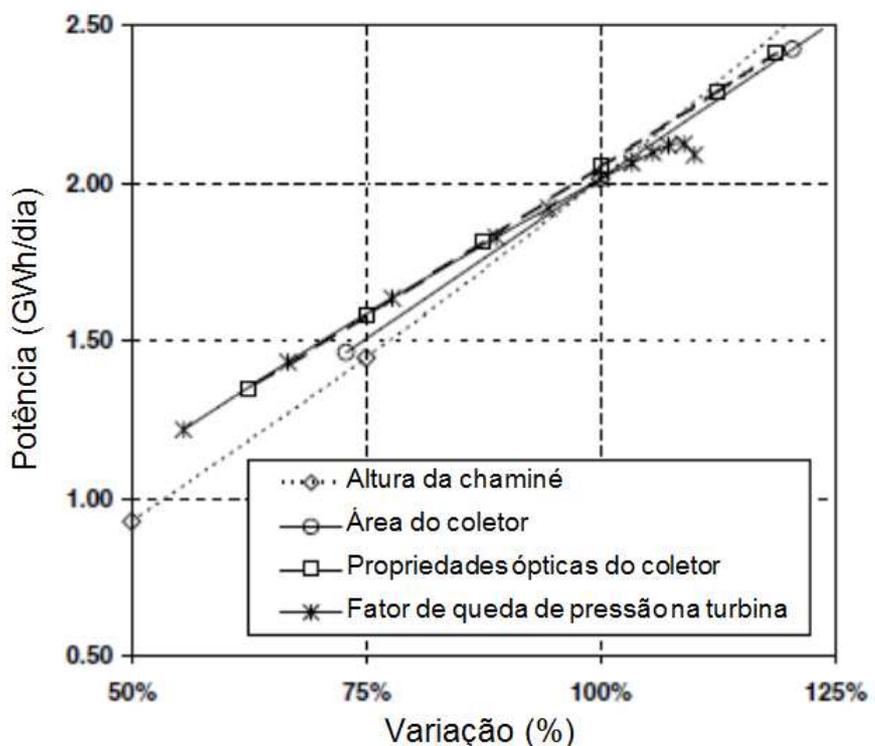


Figura 2.20: Potência gerada pela variação de diferentes parâmetros

Fonte: Bernardes *et al.* (2003)

Em relação à aplicação de modelos termodinâmicos, preocupado com as várias simplificações adotadas por diversos autores na literatura, Petela (2009) aplicou conceitos da termodinâmica às chaminés solares tentando abranger o máximo possível de parâmetros. Análises com respeito à energia, massa e exergia foram realizadas. Conclui-se que, mesmo desejando considerar todas as características e parâmetros envolvidos, hipóteses simplificativas necessitam ser empregadas, devido à complexidade envolvida em todo o processo.

Koonsrisuk *et al.* (2010) propuseram um método diferenciado para determinar a vazão mássica e conseqüente velocidade do ar no interior da chaminé solar. O método é baseado na hipótese de que a diferença total de pressão é devido à soma da perda de carga abaixo do coletor, na chaminé e devido também à aceleração do fluido decorrente da redução na área. O método, porém, não prevê a perda de carga na turbina, assim como simplifica o calor absorvido pela corrente de ar como sendo todo o fluxo de calor incidente, ou seja, não leva em conta o calor absorvido pelo coletor ou pelo solo. Outro ponto negativo do trabalho foi à falta de validação do modelo com base nos dados de Manzanares (Schlaich, 1983).

De modo a avaliar quantitativamente a potência de saída e as perdas de energia em uma chaminé solar, Xu *et al.* (2011) analisaram a influência da radiação solar e da queda de pressão na turbina em função da vazão de ar e da transferência de calor. Verificaram que grandes fluxos de massa na saída da chaminé, relacionados com a altura da chaminé e diâmetro do coletor, aumentam a potência da planta, mas não linearmente, pois a perda de carga também aumenta.

## 2.5 MODELOS EXPERIMENTAIS

No intuito de analisar uma pequena chaminé solar para testar o comportamento térmico de dois tipos de coberturas plásticas, além de realizar um balanço energético para determinar a viabilidade de aplicação para a secagem de alimentos, Ferreira *et al.* (2006) utilizaram equipamentos como anemômetros, solarímetros e termômetros para monitorar esta pequena central de geração eólica para geração de energia elétrica. Verificou-se que os filmes testados possuem transmissividade relativamente alta no espectro visível, porém o mesmo ocorre para a radiação infravermelha (ondas longas), reduzindo o efeito de estufa que um bom material vítreo oferece. O comportamento e a diferença entre estes dois materiais plásticos é mostrada na Figura 2.21. Desta forma, alguma energia é perdida pela cobertura para o ambiente, e a eficiência da planta é prejudicada. Outro ponto observado pelos autores foi à

perda de energia do solo para o subsolo, devido à falta de isolamento neste local. Fatores, como a altura da chaminé, abertura (altura) da entrada de ar (que foi de apenas 0,05 m) e outros fatores geométricos não foram analisados, bem como fatores construtivos de turbinas.

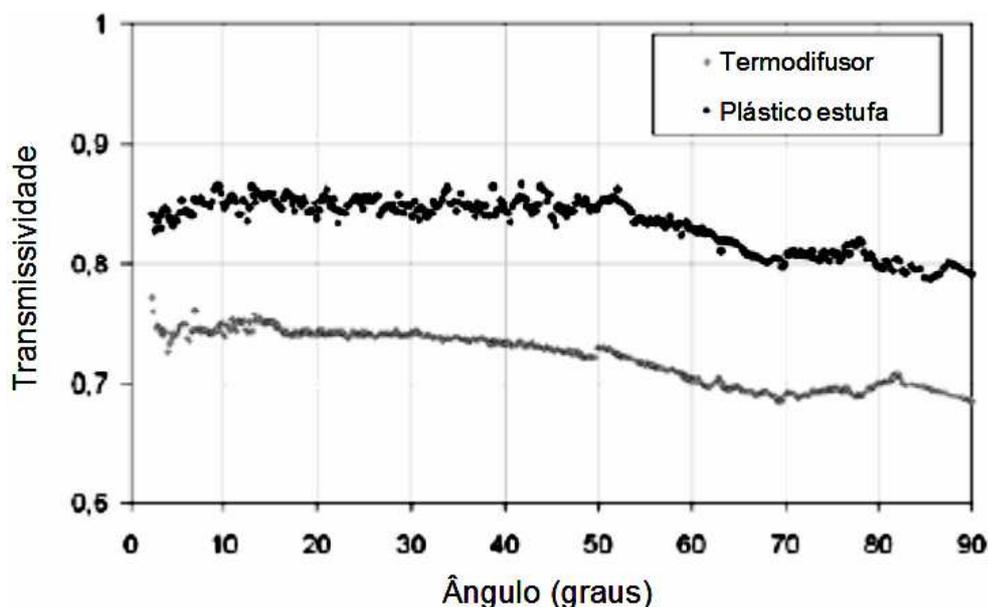


Figura 2.21: Transmissividade de diferentes materiais plásticos em função do ângulo zênite.

Fonte: Ferreira *et al.* (2006)

De forma a investigar o campo de temperatura em cada ponto de uma chaminé solar e o efeito do período solar nesta distribuição de temperatura, Zhou *et al.* (2007) construíram um protótipo experimental na China, em escala dimensional reduzida, estudando o campo de temperaturas em seu interior. O coletor possui um diâmetro de 10 metros e a chaminé possui 8 metros de comprimento, feito com tubo de drenagem em PVC de 0,3 m de diâmetro (Figura 2.22). A diferença máxima de temperatura entre a chaminé e o ar ambiente foi de 24,1 °C, suficiente para gerar empuxo e produzir um fluxo de ar constante. Apesar do grande potencial do trabalho, obtendo vários dados experimentais, não foi apresentado o fluxo de ar gerado, contudo comentam o uso de anemômetros. Também não foi determinada a potência que poderia ser gerada com este protótipo ou em plantas maiores, na mesma região, usando métodos de semelhança dimensional.



Figura 2.22: Protótipo experimental em escala reduzida construído na China.

Fonte: Zhou *et al.* (2003)

## 2.6 MODELOS INOVADORES

A concentração de ar quente e úmido ao nível do solo pode ser utilizada em chaminés solares em um arranjo que dispensa uma chaminé sólida. Tal estudo foi proposto por Ninic e Nizetic (2009), e os resultados revelaram que esta concentração pode ser alcançada pela formação de uma coluna de vórtex gravitacional na saída da turbina. Uma análise analítica, teórica e numérica foi apresentada pelos autores. Um modelo termodinâmico foi utilizado, muito semelhante ao ciclo Brayton. A proposta é inovadora, apesar de ter sido proposto há quase um século por Dessoliers (Ninic e Nizetic 2009 apud Dessoliers 1913). O atrativo principal é a eliminação de uma chaminé sólida, reduzindo significativamente os custos de implantação deste tipo de usina, já que outros autores citam uma altura de pelo menos 200 m para a chaminé.

Ninic e Nizetic (2009) modelaram o sistema como um fluxo ascendente deixando a chaminé logo após a turbina. Este fluxo ascendente possui um fluxo espiralado, na forma de um vórtice, e sua pressão é menor que a pressão atmosférica para a mesma altitude. Após a expansão adiabática na turbina, o ar que sai do coletor só consegue retomar sua pressão inicial

se rejeitar uma grande quantidade de calor. O esquema deste tipo de arranjo pode ser visualizado na Figura 2.23.

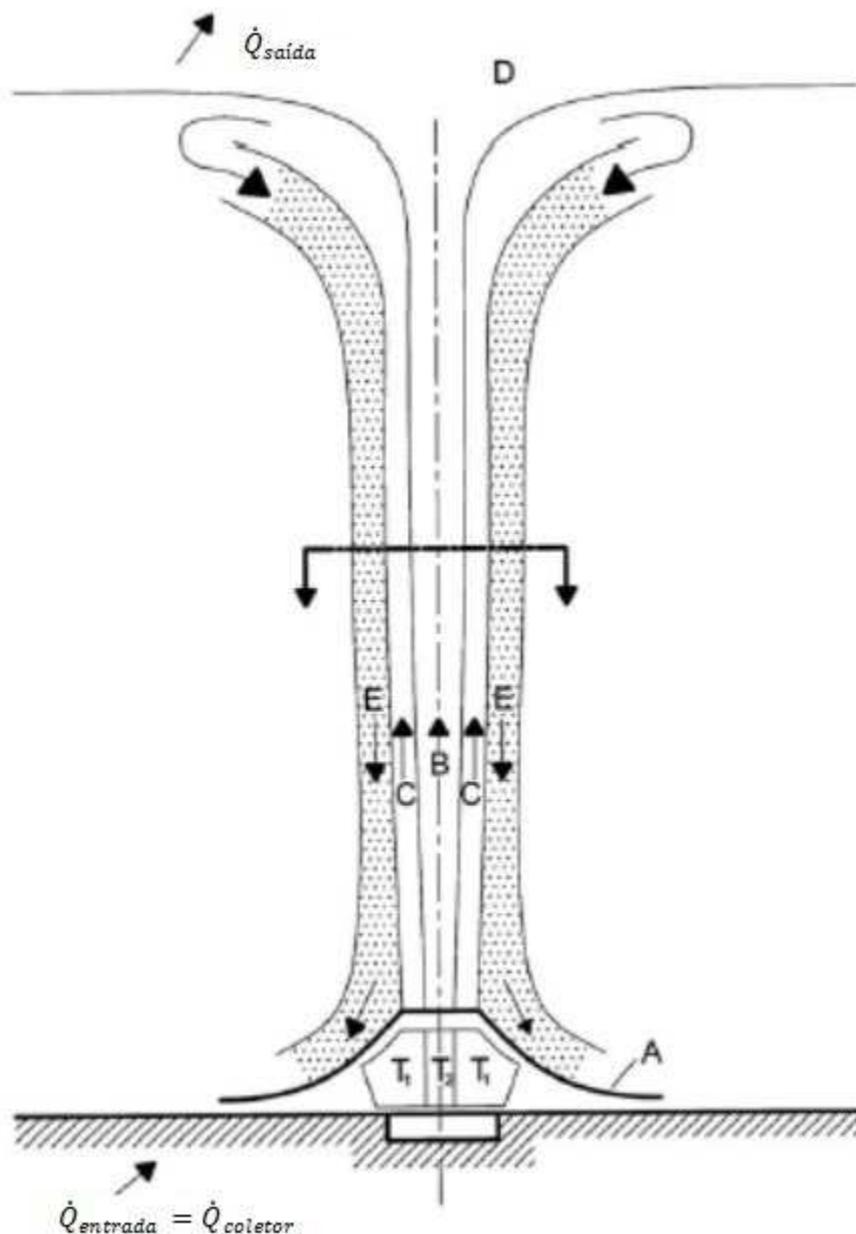


Figura 2.23: Planta que opera pelo princípio de Coluna de Vórtex Gravitacional.

Fonte: Ninic e Nizetic. (2009)

A primeira forma de se conseguir este vórtex gravitacional é fazendo com que a região periférica deste ar ascendente possua uma alta pressão e que esteja resfriado. Após chegar a uma altura correspondente à troposfera (aproximadamente 10.000 m), o ar ascendente já perdeu calor suficiente e sua pressão estabiliza com a pressão atmosférica para a mesma altitude. Esta corrente agora desce na região periférica da corrente inicial, já resfriada e com maior pressão. Esta corrente descendente possui também a forma de vórtice, mas ocorre em uma região anular. Por outro lado, o ar resfriado que desce não pode descer sem conter em

sua composição uma grande quantidade de água condensada ou partículas de gelo em sua composição. Seria como um fluxo descendente induzido por precipitação de partículas. A saturação adiabática com vapor para gotículas condensadas aumenta a densidade do ar e contribui para que o ar desça. A potência gerada por esta proposta foi determinada numericamente pelos autores em 60 MW. Os resultados numéricos ilustrados nas Figuras 2.24 a 2.26 mostram a distribuição de pressão, velocidade em  $z$  e velocidade radial, respectivamente. Apesar de menos dispendiosa economicamente por não possuir chaminé sólida, o investimento continua alto devido ao coletor e ao conjunto turbo gerador, e diversos fatores, como velocidade externa do ambiente, não foram consideradas e podem colocar em risco o investimento.

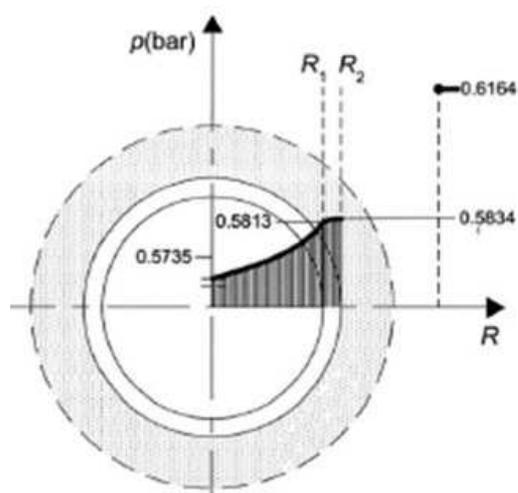


Figura 2.24: Distribuição de pressão ao longo do raio para uma altura de 4000 m.

Fonte: Ninic e Nizetic. (2009)

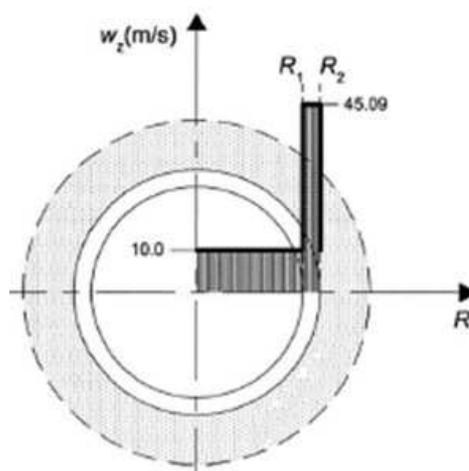


Figura 2.25: Distribuição de velocidade em  $z$  ao longo do raio para uma altura de 4000 m.

Fonte: Ninic e Nizetic. (2009)

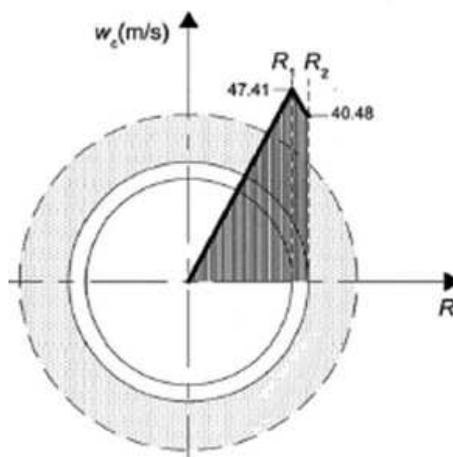


Figura 2.26: Distribuição de velocidade radial para uma altura de 4000 m.

Fonte: Ninic e Nizetic. (2009)

Altmann *et al.* (2005), analisaram a viabilidade técnica e econômica de implementação de uma torre de energia na Austrália, funcionando de modo diferenciado, pois é esperada uma corrente de ar de cima para baixo, com injeção de umidade no fluxo de ar seco e quente na parte superior da torre, que é bombeada com parte da energia gerada na torre. O princípio de funcionamento é parecido com a segunda parte do processo de Ninic e Nizetic (2009). O ar úmido resfriado e mais denso segue para baixo da torre, que deve possuir uma altura de 1200 m e um diâmetro de 400 m. Na parte de baixo da torre ficaria a turbina, onde a corrente de ar a alta velocidade atuaria na turbina gerando eletricidade.

A produção de energia desta torre de energia depende de vários fatores, entre eles as propriedades do ar atmosférico, principalmente a sua temperatura, umidade e pressão. Ar mais quente e seco na extremidade superior resulta em uma diferença maior de temperatura entre a entrada e a saída da torre, aumentando a potência esperada de saída.

Naturalmente, as características do ar variam no espaço e no tempo, desta forma a produção de energia varia diariamente e anualmente. Além disto, a geração de potência está diretamente ligada com as condições geográficas da instalação, como radiação solar na parte externa e próxima a uma fonte natural de água para reduzir custos de bombeamento da mesma. Uma descrição de seu funcionamento é mostrada na Figura 2.27.

Os autores realizaram um estudo de simulação de operação durante um ano no continente australiano. Foram analisadas duas regiões, denominadas A e E. A região A (na área de Port Hedland) foi caracterizada como a mais favorável, visto uma produção anual de energia de  $370 \pm 160$  MW, promovendo eletricidade para uma população de 0,5 milhões de

peças a um custo competitivo de A\$0,047/kWh. A região E não foi tão bem sucedida, com uma geração de  $230 \pm 140$  MW a um custo de A\$0,073/kWh.

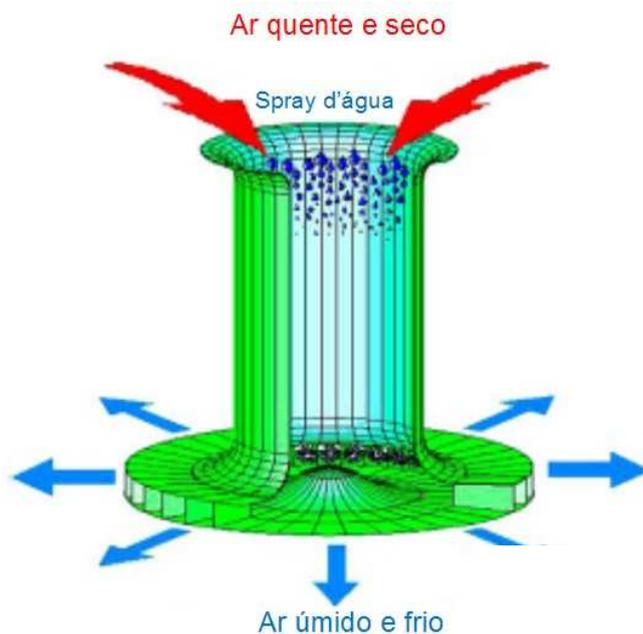


Figura 2.27: Torre de energia

Fonte: Altmann *et al.* (2005)

Outra planta derivada da tecnologia de chaminé solar foi proposta e discutida por Kashiva e Kashiva (2008) e denominada de ciclone solar. A proposta era, além de produzir energia elétrica, extrair água fresca da atmosfera. O princípio de funcionamento é composto por uma estufa que coleta e armazena energia solar na forma de calor e por uma chaminé central que gera empuxo para movimentar o ar aquecido. A diferença entre esta proposta e uma chaminé solar comum pode ser observada na Figura 2.28. Um indutor de vórtice, que são guias que induzem o ar a se mover circunferencialmente, é introduzido no coletor, em um raio de aproximadamente  $1/3$  do raio do coletor.

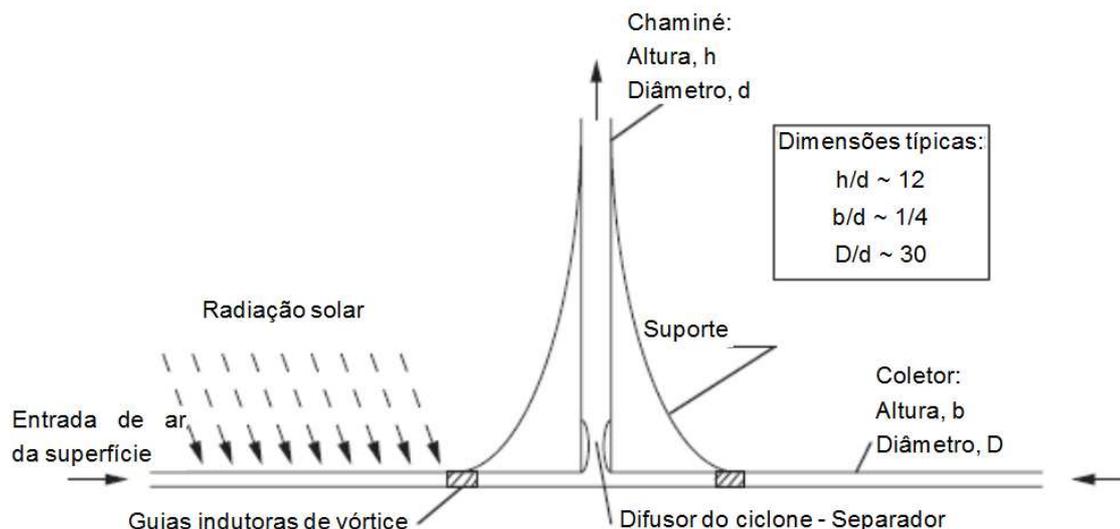


Figura 2.28: Ciclone solar para remoção de água da atmosfera e geração de energia.

Fonte: Kashiva e Kashiva (2008)

O ar, que agora está em escoando de forma tangencial após passar pelas guias, move-se em direção ao centro do coletor, onde está a chaminé, e, conforme se aproxima da chaminé, a componente radial e angular desta velocidade aumenta. As leis da conservação garantem que este aumento na velocidade é acompanhado por uma redução na pressão, temperatura e densidade. Desta forma, quando a temperatura está suficientemente abaixo da temperatura de orvalho, a condensação ocorre. A velocidade chega a um máximo, e a pressão, temperatura e massa específica a um mínimo, quando o movimento do ar muda da direção radial (para o centro) para a direção vertical (para cima), no encontro do coletor com a chaminé.

A Figura 2.29 mostra o princípio de funcionamento do separador. Este possui a aparência de um bocal convergente-divergente, cujo fluxo de ar em seu interior está girando. Na parte convergente do bocal a temperatura média cai abaixo do ponto de orvalho para o ar, onde ocorre a condensação da névoa. A turbulência causa um rápido crescimento das gotas em seu interior, e a ação centrífuga move as gotas para a superfície do separador. Nesta superfície o filme de água condensada também circula tangencialmente, e é guiado a uma abertura coletora. Uma quantidade de pressão negativa, relativa a este nível de altura onde está a abertura, é mantida pelo coletor de água por um tubo respirador ligado até a parte central do coletor, onde a pressão é menor. O gerador eólico para a geração de energia elétrica pode ser inserido em qualquer local no fluxo de ar, e, neste caso, foi colocada abaixo do separador de umidade.

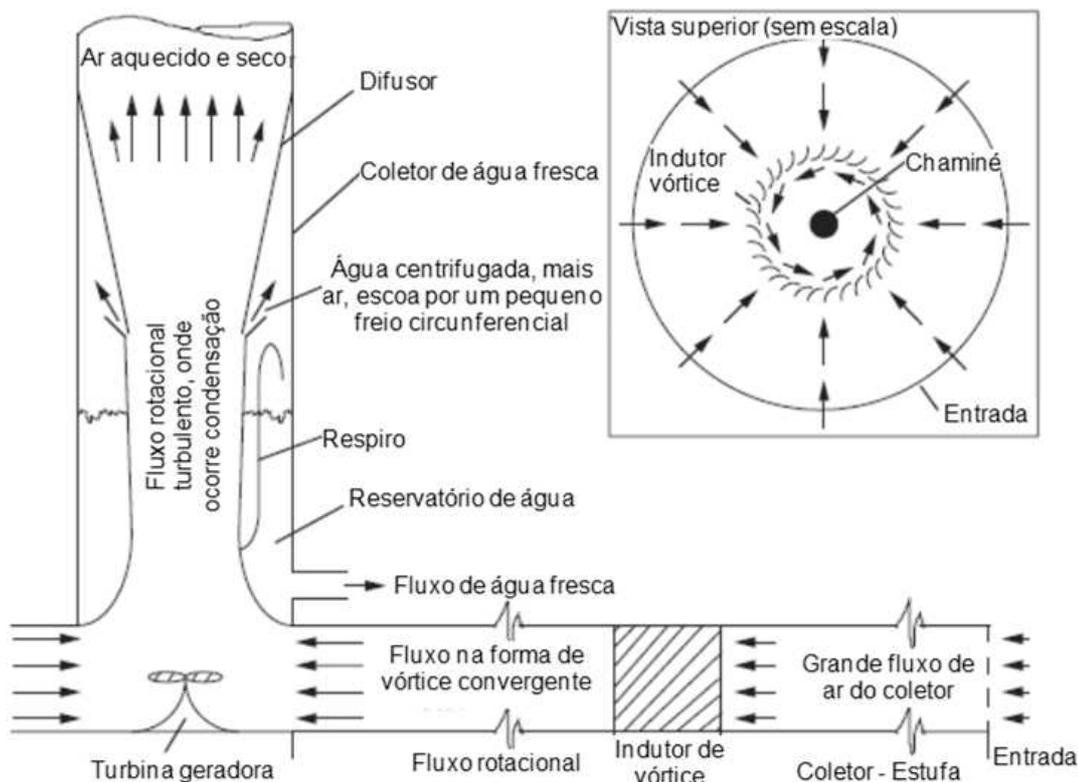


Figura 2.29: Detalhe do gerador de vórtice no coletor, e do separador na base da chaminé.

Fonte: Kashiva e Kashiva (2008)

Porém, acima da turbina um indutor gera um vórtice no qual a temperatura em seu interior é bem abaixo da temperatura de orvalho do ar, fazendo com que a umidade presente no fluxo de ar se condense e seja coletada para abastecer um pequeno povoado. Uma análise grosseira conduzida pelos autores indica que a usina, que deve possuir uma chaminé de 500 metros de altura, possa suprir 75% das necessidades de água e 100% das necessidades de energia elétrica de uma região urbana de 10.000 habitantes. A eficiência na remoção de água da atmosfera foi estimada em cerca de 80%, funcionando mesmo em regiões áridas. Esta eficiência é determinada como sendo a razão entre a umidade realmente retirada do fluxo de ar (diferença entre a umidade absoluta na entrada e na saída do separador) e a máxima umidade absoluta que poderia ser extraída do ar, ou seja, a umidade absoluta na entrada do separador.

Os resultados de extração de água de acordo com a altura da chaminé e a umidade absoluta podem ser observados nas Figuras 2.30 e 2.31, onde  $q_A$  ( $g_{H_2O}/kg_{AR}$ ) nas Figuras 2.30 a 2.33 é a umidade absoluta do ar atmosférico.

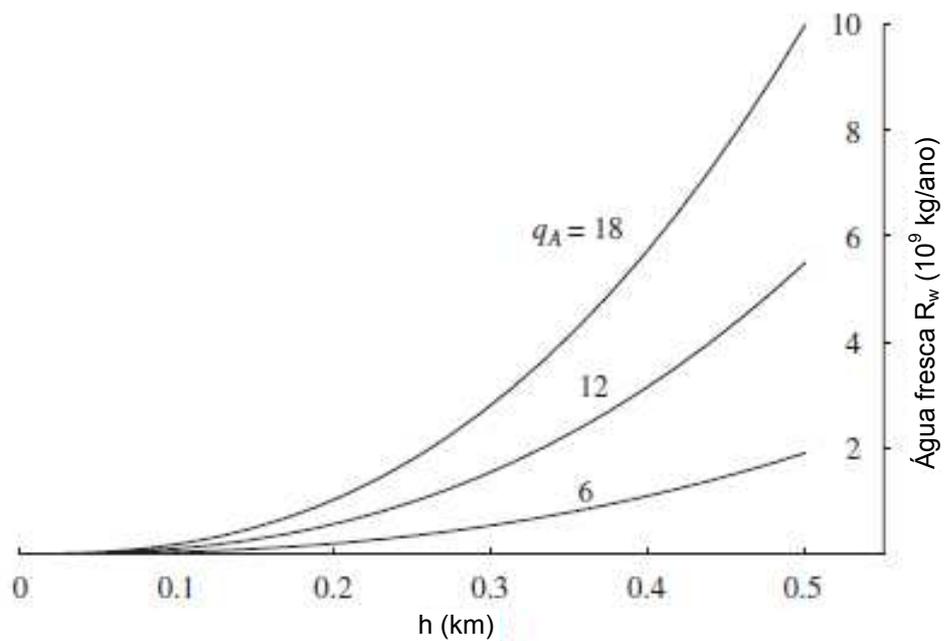


Figura 2.30: Produção de água potável versus altura da chaminé (  $0 < h < 500$  m).  
 Fonte: Kashiva e Kashiva (2008)

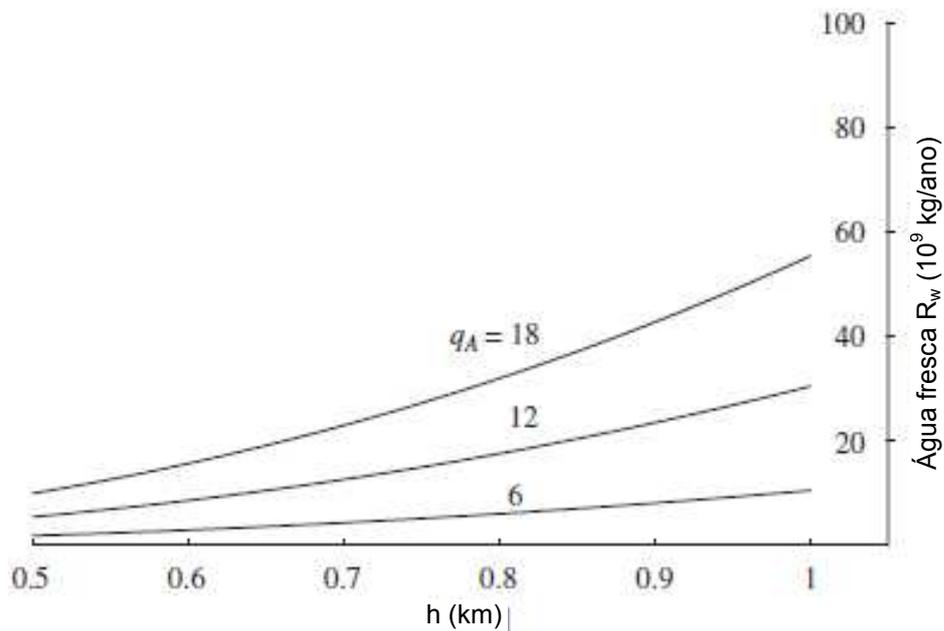


Figura 2.31: Produção de água potável versus altura da chaminé (  $500 < h < 1000$  m).  
 Fonte: Kashiva e Kashiva (2008)

Os resultados de geração de potência de acordo com a altura da chaminé e a umidade absoluta podem ser observados nas Figuras 2.32 e 2.33.

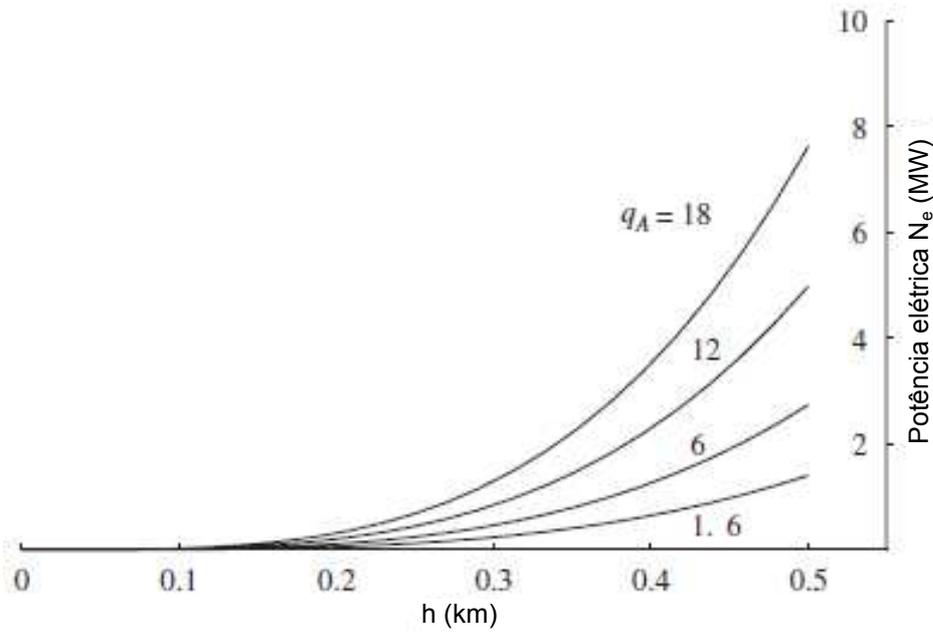


Figura 2.32: Produção de energia elétrica versus altura da chaminé ( $0 < h < 500$  m).

Fonte: Kashiva e Kashiva (2008)

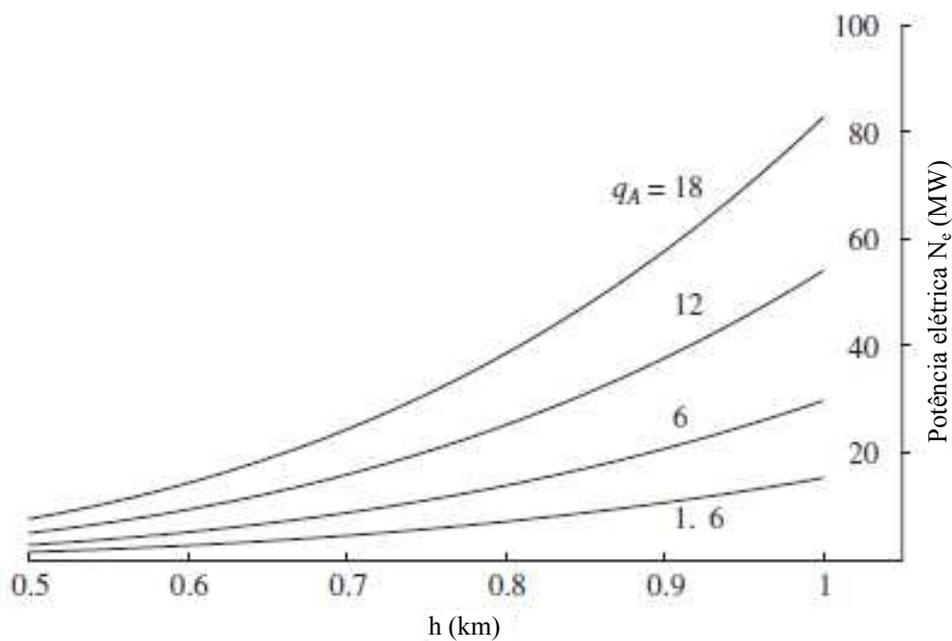


Figura 2.33: Produção de energia elétrica versus altura da chaminé ( $500 < h < 1000$  m).

Fonte: Kashiva e Kashiva (2008)

A proposta de Kashiva e Kashiva seria de grande importância para comunidades isoladas, com abundância de insolação e escassez de água.

## 2.7 CONCLUSÕES PARCIAIS

A revisão da literatura citada neste capítulo teve por objetivo situar o estado da arte de chaminés solares, embasando teoricamente o trabalho com base nos trabalhos que foram e estão sendo conduzidos no mundo, de maneira a nortear este trabalho.

Apesar de muitos autores apresentarem seus trabalhos de simulação envolvendo chaminés solares, muitos adotam hipóteses muito simplificativas, e não raro são os casos onde discrepâncias entre autores são encontradas.

Contudo, alguns autores merecem destaque, por possuírem modelos matemáticos e numéricos mais precisos e ainda modelos matemáticos propostos muito interessantes. Os trabalhos importantes para este trabalho são comentados a seguir.

Para o início da confecção do modelo matemático e numérico, é necessário partir de alguns modelos existentes na literatura e adaptá-los, se necessário, para a obtenção de uma precisão maior nos resultados, e fundamentar teoricamente este modelo no capítulo a seguir. Para os modelos matemático e numérico, dois se destacaram, sendo o primeiro de Bernardes *et al.* (2003), por possuir uma boa concordância com os resultados experimentais de Manzanares (Schlaich, 1983), e o segundo de Koonsrisuk *et al.* (2010), por ser um modelo interessante onde a soma das perdas de carga encontradas no sistema deve ser igual a diferença total de pressão desenvolvida na planta.

De forma a tornar estes modelos mais precisos, duas novas abordagens são conduzidas. Uma delas é o correto tratamento da radiação, no que concernem as múltiplas reflexões de raios solares, na superfície vítrea do coletor e entre o coletor e o solo. O estudo deste fenômeno de múltiplas reflexões no vidro foram conduzidas por Strobel *et al.* (2007), enquanto que as múltiplas reflexões entre o material vítreo e o solo é proposto e estudado neste trabalho, sendo fundamentado no capítulo 3 a seguir. Esta nova abordagem é aplicada tanto no modelo de Bernardes *et al.* (2003) como no de Koonsrisuk *et al.* (2010).

A outra abordagem, utilizada apenas no modelo de Koonsrisuk *et al.* (2010), consiste em acrescentar um maior número de perdas de carga localizadas encontradas em chaminés solares, e estudadas por Von Backström *et al.* (2006), visto o modelo original de Koonsrisuk *et al.* (2010) considerar apenas o efeito da perda de carga abaixo do coletor, devido a aceleração do fluido no coletor e ainda na chaminé. Estas perdas de carga são transformadas

em acréscimo do fator de perda de carga da turbina, de maneira que a modificação no modelo se dá apenas numericamente neste parâmetro.

Estes quatro modelos, os dois originais de Bernardes *et al.* (2003) e de Koonsrisuk *et al.* (2010) e estes dois modelos modificados pela proposta deste trabalho são validados com base nos dados de Manzanares, fornecidos por Weinrebe (2010) - Anexo II.

Em qualquer estudo, as hipóteses simplificativas devem apresentar uma razão de ser. Uma hipótese adotada por este trabalho considera que não há variação significativa de temperatura na vertical dentro de uma seção do coletor, entre o solo e a cobertura vítrea. Esta hipótese foi testada experimentalmente por Zhou *et al.* (2007), onde o campo de temperatura no interior de uma chaminé de pequena escala foi obtido, e não houveram variações significativas de temperatura na vertical entre o solo e o coletor para diversas seções analisadas.

Estudando a bibliografia conduzida pela comunidade acadêmica, este trabalho vem a contribuir nos seguintes aspectos: fornece uma nova abordagem matemática para o tratamento de chaminés solares, compara os modelos utilizados e os valida com base nos dados da planta experimental de Manzanares, através de um programa computacional desenvolvido em C++, estuda e fornece dados de potencial energético do uso combinado com módulos fotovoltaicos, realiza um levantamento do potencial energético de chaminés solares no Brasil para uma geometria predefinida, analisa a influência de parâmetros geométricos (diâmetro do coletor e altura da chaminé) na geração de energia para 50 cidades brasileiras com maior incidência de radiação solar, tanto no inverno como no verão, analisa a influência de parâmetros ópticos (qualidade do material vítreo do coletor) na geração de energia e por fim realiza uma análise de sensibilidade sobre o efeito da localização dos módulos fotovoltaicos na geração de energia combinada.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Antes de iniciar qualquer análise sobre chaminés solares, é importante definir as proposições de concepção de chaminés solares que são abordados doravante.

Dentre as diversas configurações diferentes de chaminés solares existentes, algumas já mostradas na revisão bibliográfica, existem duas concepções que despertam interesse para a aplicação em território brasileiro.

O primeiro modelo, denominado modelo A, é a chaminé solar para a geração de energia elétrica, constituída por um coletor e por uma chaminé central. Este modelo pode ser melhor visualizado na Figura 3.1. Neste modelo, além de realizar uma análise da região mais adequada para implantá-lo, pretende-se estudar a influência da altura da chaminé, diâmetro do coletor e qualidade do material vítreo do coletor.

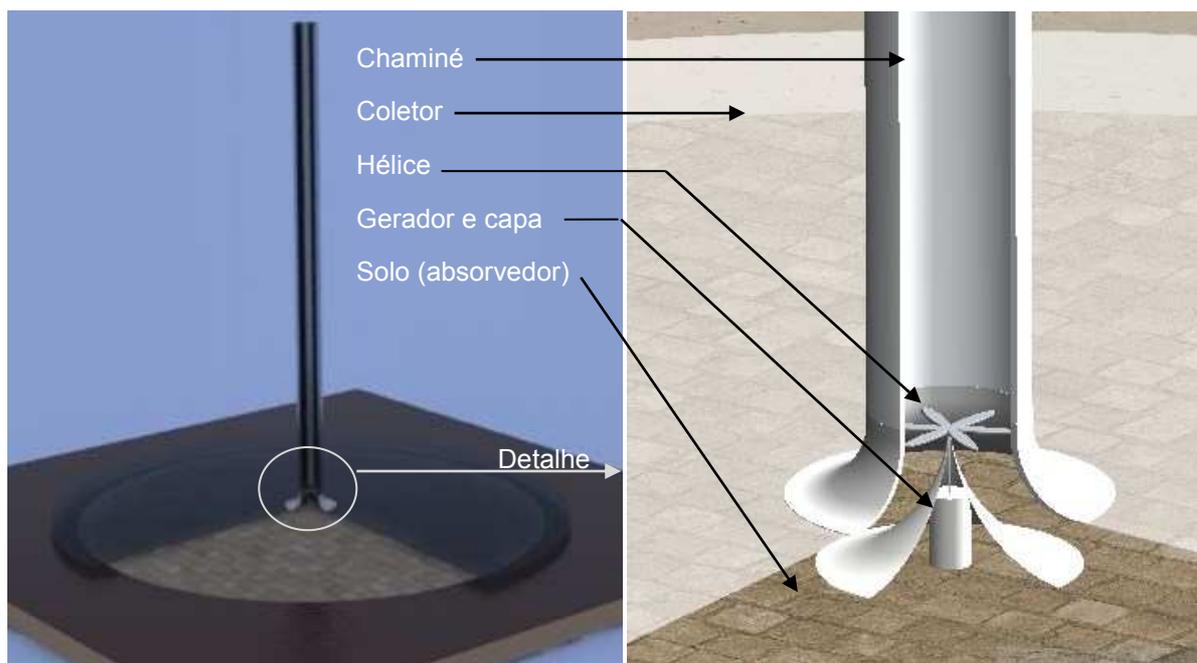


Figura 3.1: Modelo A proposto para a geração de energia elétrica.

Além deste modelo, é analisada a utilização de uma sub-planta de geração de energia elétrica baseada em módulos fotovoltaicos para atuar em geração paralela com a chaminé solar. Este segundo é denominado modelo B. Uma ilustração deste modelo pode ser visualizada na Figura 3.2. O estudo do modelo B é conduzido em conjunto com o modelo apresentado anteriormente.

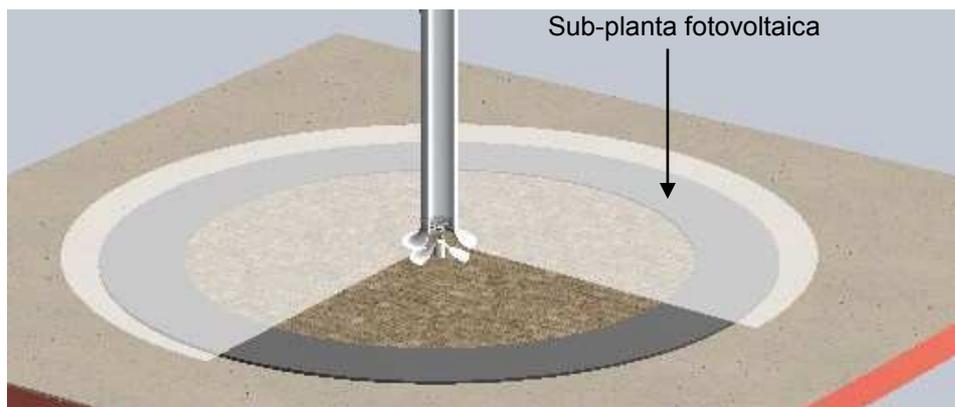


Figura 3.2: Modelo B proposto para a geração combinada com módulos fotovoltaicos.

Definido as concepções utilizadas, a seguir é apresentada a fundamentação teórica envolvendo o modelo matemático e numérico utilizado.

### 3.1 MODELAGEM DO AR NO INTERIOR DO COLETOR

O modelo adotado considera o escoamento misto em regime semi-permanente (é considerado regime permanente para um determinado horário do dia, e, após a solução atingir uma convergência, é alterado o passo de tempo) e condições de contorno prescritas para a velocidade (a velocidade inicial é arbitrada, e, após o cálculo do acréscimo de temperatura provido pelo coletor, uma nova velocidade é calculada, até que a convergência ocorra). O fluido de trabalho é o ar, onde a velocidade do escoamento de ar é função da força de empuxo ocasionada pelo acréscimo de temperatura do ar no coletor. Esta análise deve ser cuidadosa, porque há a influência do material vítreo da cobertura e da condução transiente no solo.

Para investigar o fluxo de ar no interior do coletor e da chaminé e a consequente potência gerada pela chaminé, é necessário adotar algumas hipóteses simplificativas, entre elas: o coletor é modelado como uma superfície plana, a altura do coletor é mantida constante sobre um terreno também plano, o coletor possui uma cobertura vítrea simples, o fluxo de ar é axissimétrico, ou seja, o aquecimento desigual da superfície do coletor em relação ao eixo de simetria é negligenciado e, conforme Zhou *et al.* (2007), o gradiente vertical de temperatura entre o solo e o coletor pode ser desprezado.

A Figura 3.3 mostra uma ilustração do percurso do fluxo de ar dentro da chaminé solar. A massa de ar da atmosfera entra pelo ponto 1, e é aquecido pelo coletor vítreo até o ponto 2. Do ponto 2 até o ponto 3, o ar muda o sentido de escoamento de radial para escoamento axial, e entra na turbina, onde a energia cinética do escoamento é transformada em potência mecânica. Do ponto 4, na saída da turbina, o ar ainda quente é conduzido, por meio de forças

de empuxo, até o ponto 5, localizado a uma altura onde a pressão atmosférica é menor, e é descarregado novamente para a atmosfera.

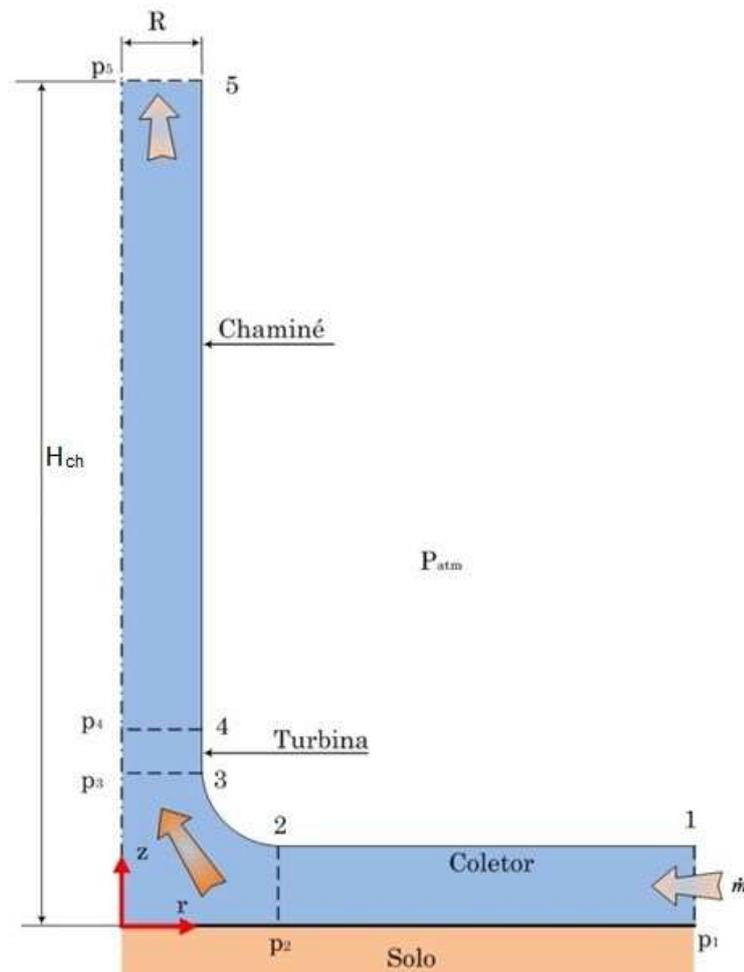


Figura 3.3: Representação do modelo da planta

É importante ressaltar que, apesar das equações da conservação da massa e da quantidade de movimento no coletor serem analisadas em coordenadas cilíndricas, alguns coeficientes de transferência de calor, assim como o ganho de calor em uma seção do coletor, são analisados como placas planas em coordenadas retangulares. Isto é possível devido ao fato do coletor, quando da aplicação do modelo numérico como será discutido doravante, ser dividido em um grande número de seções, onde a área de saída é praticamente igual à área de entrada.

### 3.1.1 Balanço de massa de ar no coletor

Como é desconsiderado o transporte de massa através da cobertura vítrea e através do solo, e levando em conta que o modelo adotado opera em um regime semi-permanente, a equação da continuidade para o coletor pode ser escrita como:

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial r} = 0 \quad (3.01)$$

Desta forma, verifica-se que não há acúmulo ou perda de massa no interior do coletor, ou seja, a vazão em massa que entra no coletor é a mesma que sai. Salienta-se ainda que o fluido é tratado como incompressível em todo o sistema, exceto no termo de empuxo, visto ainda que o escoamento fica muito longe de Mach=0,3, pré-requisito mínimo, conforme Fox e McDonald (1995), para a condição de escoamento compressível.

### 3.1.2 Conservação da quantidade de movimento no coletor

O teorema da conservação da quantidade de movimento é igual à soma das forças de fluxo e as forças externas que agem sobre o sistema. Neste caso, entende-se por sistema o volume de controle que contorna o volume de ar dentro da seção do coletor. A equação da conservação da quantidade de movimento para o ar dentro do coletor pode ser expressa por:

$$\frac{\partial(\rho A_c u)}{\partial t} = -\frac{\partial(\dot{m}u)}{\partial r} - \frac{\partial(pA_c)}{\partial r} + p \frac{\partial A_c}{\partial r} - 2\pi r \tau_w \quad (3.02)$$

Quando integradas ao longo do raio do coletor, do ponto 1 ao ponto 2, faz-se necessário conhecer as forças externas atuantes, uma delas, a força de atrito, induzida pela tensão de cisalhamento,  $\tau_w$ , na parede do coletor, e a outra dependente das resultantes decorrentes das pressões estáticas  $p_1$  e  $p_2$ . A partir da equação (3.02), o resultado da equação da quantidade de movimento para o volume de ar no coletor se torna:

$$\frac{\partial(\dot{m}u)}{\partial t} = -\dot{m}u_2 + \dot{m}u_1 + p_1 A_1 - p_2 A_2 - 2\pi r r_c \tau_w \quad (3.03)$$

A componente de quantidade de movimento atuando perpendicularmente ao sentido do fluxo é reagida do solo, e não será calculada por não ser relevante ao problema. Após aplicar Bernoulli entre o ar atmosférico e a região de entrada do ar, a pressão no ponto 1 pode ser determinada, como sendo:

$$p_1 = p_{atm} - \frac{\rho_{atm}}{2} u_1^2 \quad (3.04)$$

A pressão estática  $p_2$  é influenciada pela turbina, e, portanto, serve como uma condição de acoplamento da equação da conservação da quantidade de movimento para o coletor e para a chaminé.

Quanto à força de atrito do ar no coletor, considera-se:

$$F = \int_{Sup} \tau_w dA \quad (3.05)$$

Fornecendo um coeficiente de atrito:

$$C_w = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho u^2 A} = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho u^2} \quad (3.06)$$

Conforme Schlichting (2004), para um escoamento laminar, o coeficiente de atrito pode ser expresso por:

$$C_w = \frac{0,664}{\sqrt{Re_L}} \quad (3.07)$$

e para um escoamento turbulento,

$$C_w = \frac{0,0594}{\sqrt[5]{Re_L}} \quad (3.08)$$

Conforme White (1974), um valor mais exato para o coeficiente de atrito pode ser dado por:

$$C_w = 0,523[\ln(0,06Re_L)]^{-2} \quad (3.09)$$

Ainda, conforme Incropera e Dewitt (1998), para um escoamento misto com transição em  $Re_L = 5 \times 10^5$ , pode-se utilizar a seguinte expressão:

$$C_w = \frac{0,074}{\sqrt[5]{Re_L}} - \frac{1742}{Re_L} \quad (3.10)$$

Onde o número de Reynolds abaixo do coletor pode ser obtido por:

$$Re_L = \frac{2\dot{m}}{\mu\pi h} \quad (3.11)$$

onde  $h$  é a altura média do coletor e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do ar em  $Pa.s$ .

Salienta-se ainda que tanto o Reynolds quanto os coeficientes de atrito são expressos em coordenadas cartesianas, visto serem aplicadas em seções muito pequenas do coletor, possibilitando a aplicação em placa plana.

Tendo em vista que uma aplicação numérica é pretendida, visto a necessidade de inúmeras iterações para a convergência do modelo, como é discutido nos capítulos seguintes, é desejável converter um modelo em regime transitório em um modelo semi-permanente, através da introdução de um intervalo de tempo. Como pré-requisito geral para este tratamento, o intervalo de tempo escolhido deve ser suficientemente pequeno para que não haja mudanças significativas nas variáveis de estado no sistema. Desta forma, tem-se que, para um determinado passo de tempo, o sistema opera em regime permanente:

$$\frac{\partial(mu)}{\partial t} = 0 \quad (3.12)$$

Desta forma, levando em consideração a equação da continuidade, a equação da conservação da quantidade de movimento em um regime permanente pode ser expressa por:

$$0 = -\frac{\dot{m}^2}{\rho_2 A_2} + \frac{\dot{m}^2}{\rho_1 A_1} + \left(p_{atm} - \frac{\rho_{atm}}{2} u_1^2\right) A_1 - p_2 A_2 - 2\pi r r_c \tau_w \quad (3.13)$$

### 3.1.3 Balanço de energia no coletor

No coletor, é considerado um fluxo de ar unidimensional, onde ocorre transferência de calor diretamente por convecção do escoamento de ar com a cobertura vítrea e com o solo. Considerando um elemento diferencial no coletor, a equação do balanço de energia fica:

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = -\nabla \vec{q} + \frac{Dp}{Dt} + \tau_w \frac{\partial u}{\partial r} \quad (3.14)$$

Para um gás ideal, tem-se:

$$\frac{Dh}{Dt} = c_p \frac{DT}{Dt} \quad (3.15)$$

Substituindo a equação (3.15) na equação (3.14), tem-se:

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = -\nabla \vec{q} + \frac{Dp}{Dt} + \tau \frac{\partial u}{\partial r} \quad (3.16)$$

Esta equação possui os termos de entalpia, calor absorvido pelo escoamento, convecção entre as superfícies e o fluido, trabalho realizado pelo fluido devido à variação de pressão no tempo e o aquecimento devido à dissipação viscosa.

O modelo prévio é simplificado por várias hipóteses:

- A variação na temperatura do ar entre os elementos diferenciais é constante (a linearidade da variação de temperatura ocorre apenas em uma seção do coletor, não significando, portanto, que a variação total de temperatura no coletor seja constante);
- Alterações na pressão entre os elementos são negligenciadas;
- Não há fluxo de massa de vapor d'água do solo para o ar ou vice-versa;
- Dissipação viscosa pode ser desprezada.

De acordo com as considerações mencionadas, para a equação da conservação da quantidade de movimento, a equação diferencial para a variação de energia em um elemento infinitesimal (Figura 3.4) pode ser expressa por,

$$\dot{m}c_p T_f + q''2\pi r dr = \dot{m}c_p \left( T_f + \frac{dT_f}{dr} dr \right) \quad (3.17)$$

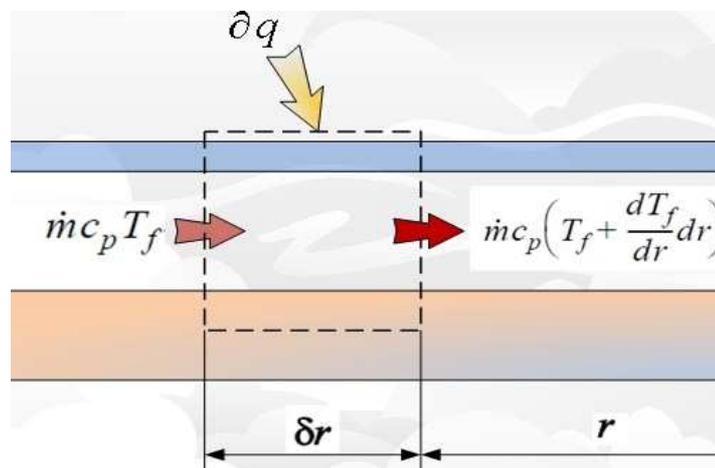


Figura 3.4: Balanço de energia em um elemento infinitesimal do coletor

Dividindo a equação 3-17 pelo elemento diferencial  $dr$ , tem-se:

$$\frac{dT_f}{dr} = \frac{q''2\pi r}{\dot{m}c_p} \quad (3.18)$$

Assumindo que o calor útil que é transferido para o ar é constante no comprimento do elemento infinitesimal, e assumindo um tratamento de placa plana em coordenadas cartesianas para uma seção de pequeno comprimento (chamando  $dr$  de  $dx$ ), a temperatura na saída a ser encontrada integrando a equação (3.18) é:

$$(T_{f,s} - T_{f,e}) = \frac{q'' 2\pi r L}{\dot{m} c_p} \quad (3.19)$$

A temperatura média do elemento,  $T_f$ , é a média aritmética entre a entrada e saída:

$$T_{f,s} = 2T_f - T_{f,e} \quad (3.20)$$

Desta forma, o fluxo de calor absorvido pelo fluxo de ar pode ser expresso para a metade do elemento como:

$$q'' = \frac{\dot{m} c_p (T_f - T_{f,e})}{\pi r L} \quad (3.21)$$

E, para simplificar a expressão para futuros algebrismos, adota-se:

$$\psi = \frac{\dot{m} c_p}{\pi r L} \quad (3.22)$$

tem-se

$$q = \psi (T_f - T_{f,e}) \quad (3.23)$$

#### 3.1.4 Modelo térmico da transferência de calor no coletor

O balanço de energia no coletor deve ser analisado cuidadosamente, pois envolve uma matriz de equações interdependentes que demandam inúmeras iterações para cada passo de tempo.

Como visto nas seções anteriores, uma etapa importante no cálculo do calor absorvido pelo coletor para posterior análise de potência e velocidade na planta, é o cálculo do acréscimo de temperatura provido pelo coletor. Para determinar este fator, uma análise térmica de todos os mecanismos de transferência de calor que atuam no coletor deve ser considerada.

Uma chaminé solar com um coletor dito simples, ou seja, apenas a cobertura vítrea sobre o solo, possui um fluxo de energia que pode ser observado na Figura 3.5. Da radiação solar incidente, uma fração é refletida, outra é absorvida pelo coletor, proporcionando o aumento na temperatura do coletor e uma fração é transmitida para o interior do sistema. Devido ao aumento da temperatura do coletor, uma fração de energia é perdida por convecção entre o coletor e o ambiente externo, outra é perdida por radiação com o céu limpo (albedo), outra é transmitida por convecção para o fluxo de ar que passa por baixo do coletor e também proporciona uma troca de calor por radiação com o solo abaixo do coletor. A fração que atravessa o coletor vítreo aquece o solo, que armazena calor e tem sua superfície aquecida, proporcionando a troca de calor por convecção para o fluxo de ar e a troca de calor por radiação com o coletor. O solo é modelado como um capacitor visto armazenar energia térmica durante o dia e libera-lo à noite para o fluxo de ar.

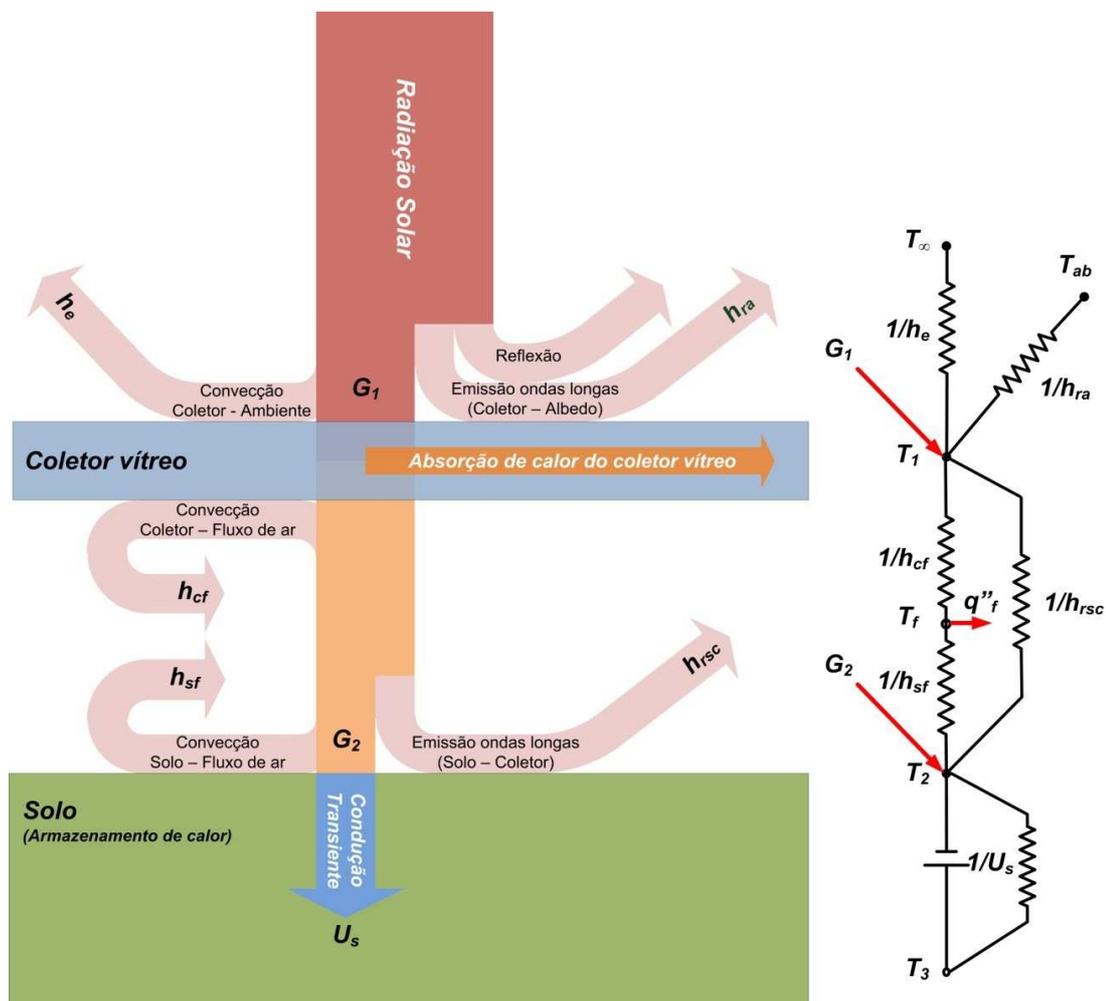


Figura 3.5: Fluxo de energia no sistema coletor x solo e circuito térmico equivalente

Cada seção pode ser analisada individualmente, utilizando o conceito de resistências térmicas em paredes planas, conforme Incropera e Dewitt (1998). Para cada nó intermediário

foi realizado um balanço de energia para o regime permanente para um dado instante, chegando-se nas seguintes equações:

$$T_1: G_1 + h_{rsc}(T_2 - T_1) + h_{cf}(T_f - T_1) = h_e(T_1 - T_\infty) + h_{ra}(T_1 - T_{ab}), \quad (3.24)$$

$$T_f: h_{cf}(T_1 - T_f) = h_{sf}(T_f - T_2) + q''_f, \quad (3.25)$$

$$T_2: G_2 = h_{sf}(T_2 - T_f) + h_{rsc}(T_2 - T_1) + U_s(T_2 - T_3), \quad (3.26)$$

Onde  $T_3$  é a temperatura da superfície do solo no passo tempo anterior:

$$T_3 = T_{2,0} \quad (3.27)$$

Definindo

$$U_e = h_e + h_{ra}, \quad (3.28)$$

e rearranjando os termos em função das temperaturas, chega-se a:

$$T_1: (U_e + h_{cf} + h_{rsc})T_1 + (-h_{cf})T_f + (-h_{rsc})T_2 = G_1 + h_e T_\infty + h_{ra} T_{ab}, \quad (3.29)$$

$$T_f: (h_{cf})T_1 - \left(h_{cf} + h_{sf} + \frac{\dot{m}c_p}{\pi r L}\right)T_f + (h_{sf})T_2 = -\left(\frac{\dot{m}c_p}{\pi r L}\right)T_{f,e} \text{ e} \quad (3.30)$$

$$T_2: (-h_{rsc})T_1 + (-h_{sf})T_f + (h_{sf} + h_{rsc} + U_s)T_2 = G_2 + U_s T_{2,0}. \quad (3.31)$$

Tais equações podem ser escritas na forma de uma matriz 3x3:

$$\begin{bmatrix} (U_e + h_{cf} + h_{rsc}) & (-h_{cf}) & (-h_{rsc}) \\ (h_{cf}) & -(h_{cf} + h_{sf} + \psi) & (h_{sf}) \\ (-h_{rsc}) & (-h_{sf}) & (h_{sf} + h_{rsc} + U_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_f \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (G_1 + h_e T_\infty + h_{ra} T_{ab}) \\ -\psi T_{f,e} \\ (G_2 + U_s T_{2,0}) \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Genericamente, a matriz acima possui a forma:

$$[A] \cdot [T] = [B], \quad (3.33)$$

onde o vetor de temperaturas pode ser determinado por inversão de matriz:

$$[T] = [A]^{-1} \cdot [B]. \quad (3.34)$$

### 3.1.5 Hipótese de escoamento

Como é previsto pela literatura para escoamento interno, conforme Incropera e Dewitt (1998) há uma diferença no perfil de velocidades no interior do coletor, visto o surgimento da camada limite fluidodinâmica, que tende a reduzir a velocidade do fluido próximo à placa. Este perfil varia com as coordenadas  $x$  e  $y$  na entrada, e, após o escoamento estar completamente desenvolvido, ou seja, com as camadas limites mescladas, passa a variar somente com  $y$ , conforme ilustra a Figura 3.6.

Para o comprimento da entrada fluidodinâmica, Chen (1973), propôs a seguinte relação:

$$\frac{L_f}{ReD_h} = 0,011 + \frac{0,315}{Re(1 + 0,0175Re)} \quad (3.35)$$

Na fronteira do escoamento laminar, onde  $Re = 2300$  obtém-se, a partir da equação (3.35), com uma altura do coletor em relação ao solo de 2m (diâmetro hidráulico de 4 m), um comprimento de entrada fluidodinâmica de 101 m.

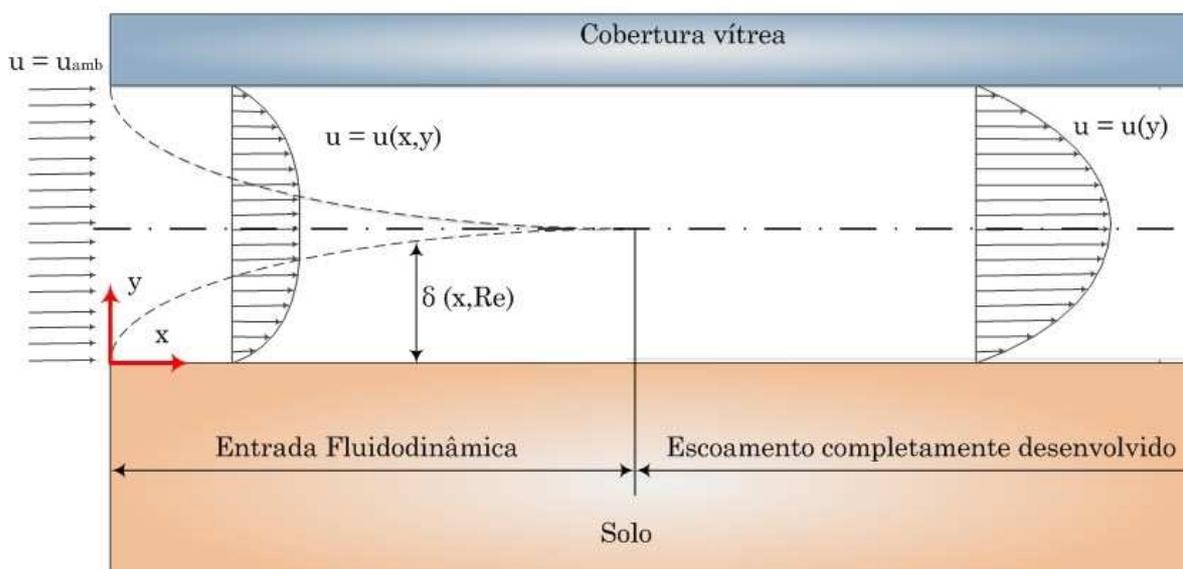


Figura 3.6: Escoamento interno entre placas planas paralelas

Já para escoamento externo sobre placas planas, conforme a Figura 3.7, o tipo de escoamento depende do número de Reynolds. Com baixos números de Reynolds, normalmente abaixo de  $5 \times 10^5$ , o escoamento é laminar. Após esta zona, o escoamento passa por uma fase de transição, e se desenvolve, após esta, para uma zona de escoamento turbulento. Este tipo de modelo é amplamente utilizado, por existirem correlações suficientes na literatura.

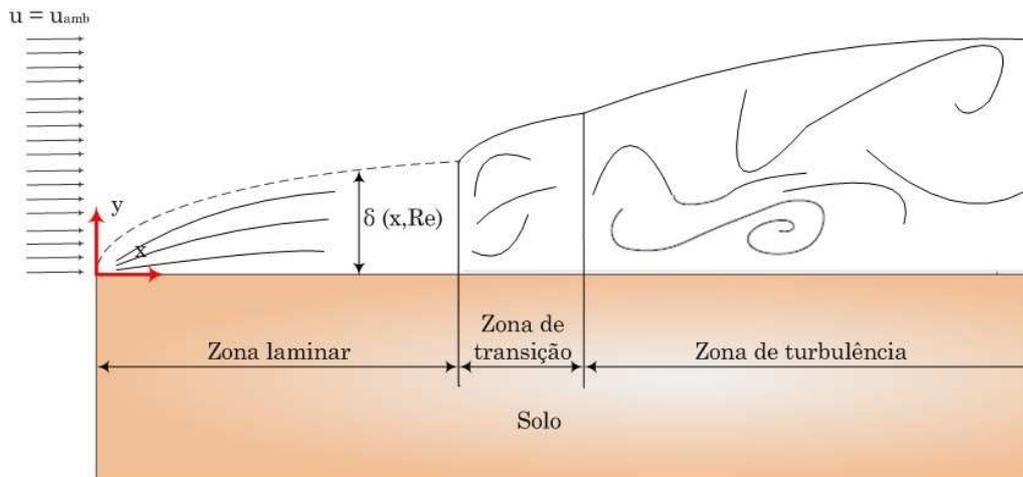


Figura 3.7: escoamento externo sobre uma placa plana

Como atualmente não existem modelos de escoamento interno adequados para estudar o fluxo instável entre duas placas que não possuem escoamento completamente desenvolvido em sua grande parte, e devido ao comprimento de entrada fluidodinâmica ser muito grande, opta-se por utilizar o modelo de escoamento externo sobre placas paralelas.

Uma vez definida a hipótese de escoamento, é possível fundamentar os parâmetros ópticos e de transferência de calor que atuam no coletor, de modo a serem utilizadas na matriz dada pela equação (3.32).

### 3.1.6 Parâmetros ópticos

O ângulo entre um raio solar e a componente vertical é denominado de ângulo de zênite, denominado  $\theta$ . Conforme Hedderwick (2001), o mesmo pode ser encontrado utilizando uma relação para uma superfície paralela ao horizonte pela seguinte expressão:

$$\theta = \text{acos}[\text{sen}(\varphi_d)\text{sen}(\varphi_{lat}) + \text{cos}(\varphi_d)\text{cos}(\varphi_{lat})\text{cos}(w)], \quad (3.36)$$

onde  $\varphi_{lat}$  ( $^\circ$ ) é a latitude do local onde a radiação é medida,  $w$  ( $^\circ$ ) é a hora solar, sendo o meio dia nulo e cada hora equivale a  $15^\circ$  de longitude, manhãs sendo positivas e tardes sendo negativas e  $\varphi_d$  ( $^\circ$ ) é a declinação, ou seja, a posição angular do Sol ao meio dia com respeito ao plano do equador (sendo o hemisfério sul negativo), dada pela equação:

$$\varphi_d = 23,45\text{sen}\left(360\frac{284+\text{dia}}{365}\right). \quad (3.37)$$

A transmissividade do material vítreo depende do coeficiente de extinção do material, função da qualidade do mesmo e do ângulo que atravessa o material. Este é função do ângulo de zênite e do índice de refração do vidro, que é de 1,526.

$$\theta_2 = \text{asen}\left(\frac{\text{sen}(\theta)}{1,526}\right) \tag{3.38}$$

E a transmissividade do vidro é dada por:

$$\tau_v = e^{-\frac{\epsilon t}{\cos(\theta_2)}} \tag{3.39}$$

onde  $\epsilon$  ( $\text{m}^{-1}$ ) é o coeficiente de extinção e  $t$  (m) a espessura do vidro.

Conforme Strobel (2007), a radiação em materiais semitransparentes sofre múltiplas reflexões, como pode ser observado na Figura 3.8:

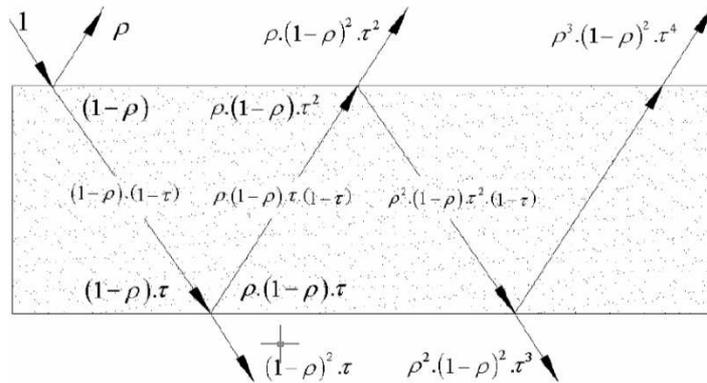


Figura 3.8: Múltiplas reflexões em um material semitransparente.

Fonte: Strobel (2007)

Uma lâmina simples de vidro como coletor apresenta uma fração total refletida, transmitida e absorvida nas seguintes magnitudes, conforme Strobel (2007):

$$R_v = \rho_v \left[ 1 + \frac{(1 - \rho_v)^2 \tau_v^2}{1 - \rho_v^2 \tau_v^2} \right] \tag{3.40}$$

$$T_v = \frac{\tau_v (1 - \rho_v)^2}{1 - \rho_v^2 \tau_v^2} \tag{3.41}$$

$$A_v = (1 - \rho_v \tau_v) \left[ \frac{(1 - \tau_v)(1 - \rho_v)}{(1 - \rho_v^2 \tau_v^2)} \right] \tag{3.42}$$

Porém, o solo também reflete radiação, gerando múltiplas reflexões entre o solo e a cobertura e novamente outras múltiplas reflexões na cobertura vítrea. A Figura 3.9 mostra o efeito que acontece no sistema cobertura/solo:

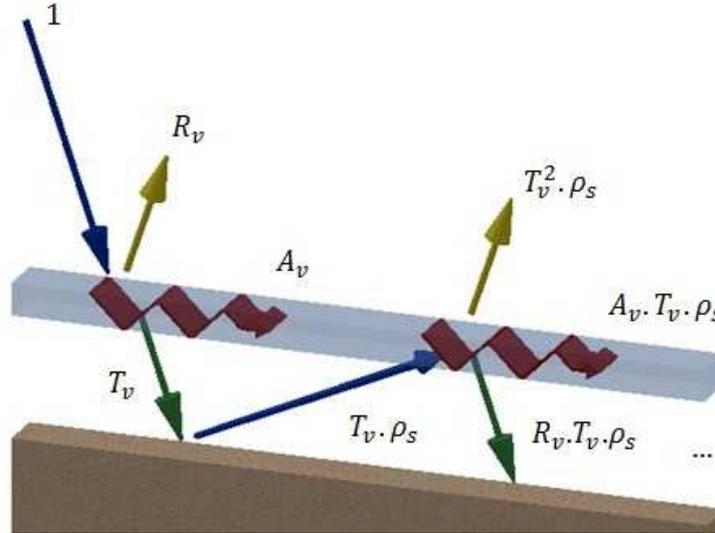


Figura 3.9: Múltiplas reflexões entre o solo e o coletor.

Para tratar as múltiplas reflexões e encontrar a fração refletida, absorvida e transmitida pelo coletor vítreo considerando o efeito do solo abaixo da cobertura, é realizada uma soma destes raios e inseridas em uma série infinita. Para resolver a série geométrica, é utilizada a seguinte expressão, conforme Simmons (1998):

$$1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} x^n = \frac{1}{1 - x} \quad (3.43)$$

A partir da Figura 3.9, a parcela refletida do coletor é dada por:

$$R_c = R_v + (\rho_s T_v^2 + \rho_s^2 T_v^2 R_v + \rho_s^3 T_v^2 R_v^2 + \rho_s^4 T_v^2 R_v^3 + \dots) \quad (3.44)$$

Evidenciando o termo  $\rho_s T_v^2$ , tem-se:

$$R_c = R_v + [\rho_s T_v^2 (1 + \rho_s R_v + \rho_s^2 R_v^2 + \rho_s^3 R_v^3 + \dots)] \quad (3.45)$$

Usando o valor da soma da série na equação (3.45), obtém-se:

$$R_c = R_v + \left[ \frac{\rho_s T_v^2}{(1 - \rho_s R_v)} \right] = \frac{R_v (1 - \rho_s R_v) + \rho_s T_v^2}{(1 - \rho_s R_v)} \quad (3.46)$$

Quanto à fração absorvida pelo coletor, a partir da Figura 3.9, a mesma é dada por:

$$A_c = A_v + (\rho_s T_v A_v + \rho_s^2 T_v A_v R_v + \rho_s^3 T_v A_v R_v^2 + \rho_s^4 T_v A_v R_v^3 + \dots) \quad (3.47)$$

Evidenciando o termo  $\rho_s T_v A_v$ , surge:

$$A_c = A_v + [\rho_s T_v A_v (1 + \rho_s R_v + \rho_s^2 R_v^2 + \rho_s^3 R_v^3 + \dots)] \quad (3.48)$$

Aplicando o somatório expresso pela equação (3.43), tem-se:

$$A_c = A_v + \left[ \frac{\rho_s T_v A_v}{(1 - \rho_s R_v)} \right] = \frac{A_v (1 - \rho_s R_v) + \rho_s T_v A_v}{(1 - \rho_s R_v)} \quad (3.49)$$

E conforme Figura 3.9, para a fração transmitida para o interior do sistema, chega-se a:

$$T_c = T_v + (\rho_s T_v R_v + \rho_s^2 T_v R_v^2 + \rho_s^3 T_v R_v^3 + \rho_s^4 T_v R_v^4 + \dots) \quad (3.50)$$

Evidenciando o termo  $\rho_s T_v R_v$ , obtém-se:

$$T_c = T_v + [\rho_s T_v R_v (1 + \rho_s R_v + \rho_s^2 R_v^2 + \rho_s^3 R_v^3 + \dots)] \quad (3.51)$$

Com o uso do somatório da equação (3.43), tem-se:

$$T_c = T_v + \left[ \frac{\rho_s T_v R_v}{(1 - \rho_s R_v)} \right] = \frac{T_v (1 - \rho_s R_v) + \rho_s T_v R_v}{(1 - \rho_s R_v)} \quad (3.52)$$

Conforme Strobel (2007), o erro induzido por não se utilizar a metodologia adequada mostrada previamente pode variar desde 2%, para solos com altas ou baixas refletâncias até 17,5%, dependendo da qualidade do material vítreo, como pode ser observado na Figura 3.10.

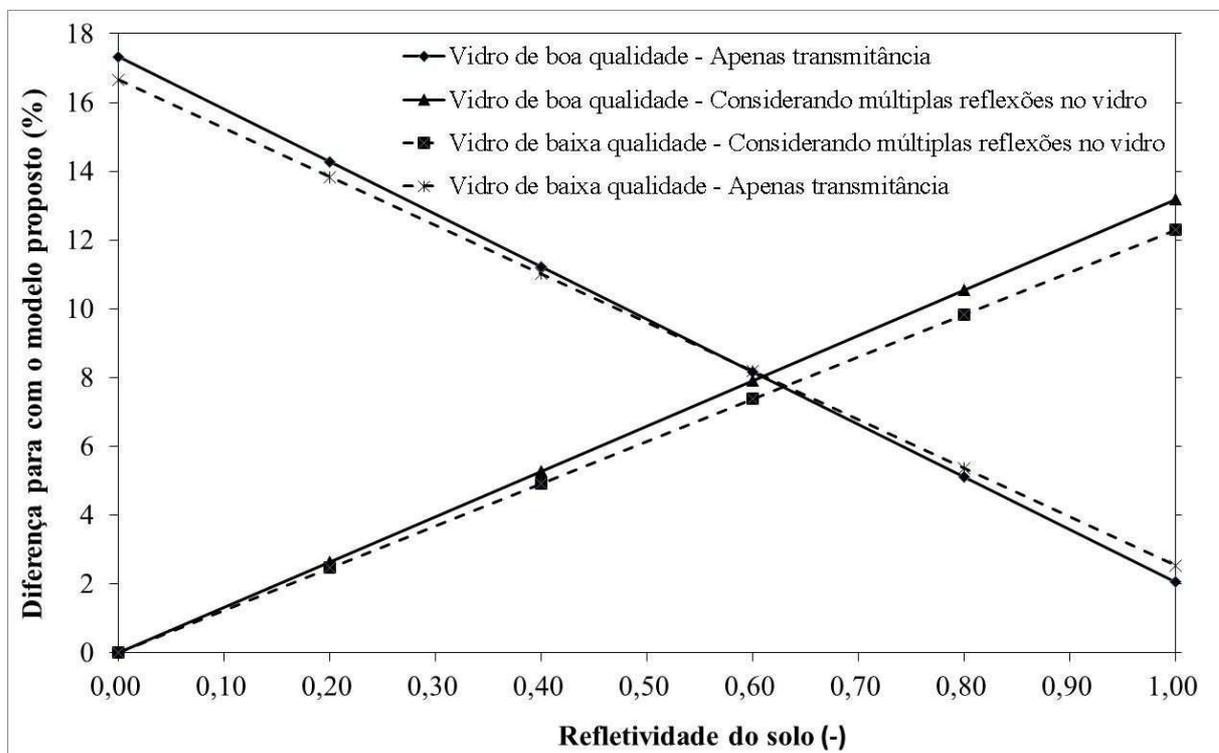


Figura 3.10: Efeito do uso de simplificações nas propriedades ópticas da interface vidro-solo

Este trabalho, a partir da revisão bibliográfica, é o único a tratar o efeito das múltiplas reflexões na cobertura vítrea do coletor, e descartar o erro cometido por esta simplificação.

Visto o comportamento óptico do sistema, é possível prosseguir com a fundamentação acerca dos parâmetros de transferência de calor no coletor.

### 3.1.7 Coeficientes de convecção e radiação

Vários coeficientes de convecção e resistências de radiação dependem fortemente das temperaturas e propriedades do ar e do ambiente.

O coeficiente global de transferência de calor na parte externa pode ser escrito como:

$$U_e = h_e + h_{ra}, \quad (3.53)$$

onde

$$h_e = \frac{kNu}{L} \quad (3.54)$$

e

$$h_{ra} = \sigma\varepsilon(T_1 + T_{ab})(T_1^2 + T_{ab}^2) \quad (3.55)$$

A temperatura do albedo,  $T_{ab}$  (K) é obtida considerando-se céu limpo (com ausência de nuvens) é obtida pela correlação apresentada por Berdahl e Martin (1984), dada por:

$$T_{ab} = T_\infty [0,711 + 56 \times 10^{-4}(T_{or} - 273,15) + 73 \times 10^{-6}(T_{or} - 273,15)^2 + 13 \times 10^{-3} \cos(15t)]^{\frac{1}{4}} \quad (3.56)$$

Onde  $T_{or}$  (K) é a temperatura de orvalho e  $t$  (h) é o tempo a partir da meia-noite.

O coeficiente de transferência de calor por radiação entre duas placas paralelas, conforme Incropera e Dewitt (1998) é dada por:

$$h_{rsc} = \frac{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_s} - 1\right)} \quad (3.57)$$

Os fluxos de calor que incidem em cada nó podem ser calculados como:

$$G_1 = GA_c \quad (3.58)$$

$$G_2 = GT_c \quad (3.59)$$

As correlações empregadas para o cálculo de Nusselt para convecção livre sobre o coletor, e para o escoamento forçado pelas forças de empuxo no interior do coletor são mostradas a seguir. Com base em Nusselt, dado pela equação (3.60), é possível determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção.

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (3.60)$$

Pretorius (2006) analisou novas correlações para o coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície externa do coletor e verificou um resultado mais preciso para o lado externo, dado por:

$$h_e = 3,87 + 0,0022 \left( \frac{w\rho c_p}{Pr^{2/3}} \right) \quad (3.61)$$

onde  $w$  é a velocidade do vento, em m/s.

Internamente, o fluido sofre dois tipos de convecção, a natural e a forçada. A convecção natural, predominante onde a velocidade do escoamento é mais baixa, e a convecção forçada, predominante quando a velocidade do escoamento é maior. A convecção natural ocorre devido aos efeitos de empuxo que o fluido sofre devido a uma diferença de temperatura entre superfícies que cercam o mesmo, e o efeito de velocidade deste fluido devem ser pequenas a ponto de não interferirem neste processo. Conforme Incropera e Dewitt (1998) tem-se:

Para superfície superior quente ou superfície inferior fria:

$$h_n = \begin{cases} \frac{0,54kRa_L^{1/4}}{L} & \text{para } 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7 \\ \frac{0,15kRa_L^{1/3}}{L} & \text{para } 10^7 < Ra_L \leq 10^{11} \end{cases} \quad (3.62)$$

Para superfície superior fria ou superfície inferior quente:

$$h_n = \frac{0,27kRa_L^{1/4}}{L} \quad \text{para } 10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10} \quad (3.63)$$

Onde o subscrito  $n$  representa a condição de convecção natural, e  $Ra$  é o número de Rayleigh, que é definido por:

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)x^3}{\nu\alpha} \quad (3.64)$$

Sendo  $x$  o comprimento característico, dado por  $A/P$ , o que neste caso resulta em  $L$ .

Para a convecção forçada, ainda existem dois tipos de regime de escoamento, quando o escoamento é laminar e quando o escoamento é turbulento. Para uma placa plana, a transição ocorre quando  $Re = 5 \times 10^5$ .

O coeficiente médio de convecção para um escoamento laminar, é dado por Baehr e Stephan (1996),

$$\bar{h}_{lam} = \frac{2k\sqrt{Re_L Pr}}{L\sqrt{\pi} \left(1 + 1,7Pr^{1/4} + 21,36Pr\right)^{1/6}} \quad (3.65)$$

E para um escoamento turbulento, conforme Gnielinski (1976):

$$\bar{h}_{turb} = \frac{0,037kRe_L^{0,8}Pr}{L \left(1 + 2,443Re_L^{-0,1} \left(Pr^{2/3} - 1\right)\right)} \quad (3.66)$$

Devido à incerteza da localização exata da região de transição, pode-se utilizar a equação proposta por Baehr e Stephan (1996), para calcular um coeficiente médio de transferência de calor por convecção nas condições que incluem ambas as regiões:

$$\bar{h}_f = \sqrt{(h_{lam}^2 + h_{turb}^2)} \quad (3.67)$$

Onde o subscrito  $f$  representa a convecção forçada. Incropera e Dewitt (1998) sugerem, devido à presença da convecção natural e forçada atuando no mesmo espaço, a equação (3.68) que será adotada neste trabalho para o coeficiente médio de transferência de calor por convecção:

$$\bar{h} = \sqrt[3]{(\bar{h}_f^3 + h_n^3)} \quad (3.68)$$

Para a transferência de calor transiente no solo, conforme Incropera e Dewitt (1998), a distribuição de temperatura para um sólido semi-infinito é dada pela expressão:

$$\frac{T_3 - T_2}{T_{2,0} - T_2} = \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha t}}\right), \quad (3.69)$$

onde  $T_{2,0}$  (K) é a temperatura da superfície do solo no passo tempo anterior, e onde a função erro de Gauss é dada por:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi. \quad (3.70)$$

O fluxo de calor por unidade de área no solo fica:

$$q'' = \frac{k_s (T_{2,0} - T_2) e^{-\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha_s t}}\right)^2}}{\sqrt{\pi \alpha_s t}} \quad (3.71)$$

Para  $z = 0$ , tem-se:

$$q'' = \frac{k_s}{\sqrt{\pi \alpha_s t}} (T_{2,0} - T_2) \quad (3.72)$$

A quantidade média de calor que ocorre desde  $t = 0$  até  $t = t_1$  é:

$$q''_{0-1} = \frac{1}{t} \int_0^{t_1} q'' dt = \frac{2k_s \sqrt{t}}{t \sqrt{\pi \alpha_s}} (T_{2,0} - T_2) \quad (3.73)$$

Desta forma, o coeficiente de transferência de calor transiente para o solo é dado por:

$$U_s = \frac{2k_s}{\sqrt{\pi \alpha_s t}} \quad (3.74)$$

Onde  $t$  (s) é o tempo entre um passo tempo e o outro.

### 3.2 EQUAÇÕES GOVERNANTES NA CHAMINÉ

A chaminé é modelada partindo do pressuposto que o escoamento em seu interior é unidimensional (vertical em  $z$ ). Seu grande diâmetro reduz a perda de carga devido ao atrito.

A correta modelagem deste componente permite verificar qual a máxima velocidade que pode ser obtida com o acréscimo de temperatura proveniente do coletor.

Uma vez que a superfície da chaminé é fechada, e não há transporte de massa por sua parede, a equação da continuidade é dada por:

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial z} = 0 \quad (3.75)$$

O coletor aquece o ar em seu interior, e o deixa com uma menor massa específica, favorecendo o empuxo. Já a chaminé promove um aporte de diferencial de pressão devido à diferença de altitude, atuando como um catalizador para o empuxo e o conseqüente fluxo de ar. A chaminé age como um elemento conector entre a base da chaminé, localizada em um ponto com maior pressão, com a saída da chaminé, que possui uma menor pressão.

Na equação da conservação da quantidade de movimento aplicada a chaminé, tem-se:

$$\rho \frac{D\vec{w}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g \quad (3.76)$$

É adequado, em vez da força de massa  $\rho g$ , introduzir a força de empuxo,  $(\rho - \rho_{atm})g$ . Isto é obtido pela decomposição do termo de pressão em uma componente de pressão estática e outra componente de pressão dinâmica ( $p_{din} = \frac{\rho w^2}{2}$ ):

$$p = p_{est} + p_{din} \quad (3.77)$$

Para um fluido imóvel, da equação (3.76) surge o termo da pressão estática:

$$\frac{dp_{est}}{dz} = \rho_{atm} g \quad (3.78)$$

Uma vez que o processo não é isotérmico,  $\rho_{atm}$  varia com o campo de temperatura, que varia com a coordenada  $z$  de altura. Usando as equações (3.78) e (3.77) na equação (3.76), tem-se:

$$\rho \frac{D\vec{w}}{Dt} = -\nabla p_{din} + \nabla \tau + (\rho - \rho_{atm})g \quad (3.79)$$

A pressão estática  $p_4$ , na entrada da chaminé, como já mencionado anteriormente, serve como condição de contorno para acoplar as equações da conservação da quantidade de movimento no coletor e na chaminé, sendo  $p_4 = p_3$ . A queda de pressão na turbina, dada pelos pontos 2 e 3, serão incluídos posteriormente.

Considerando o fluido invíscido, ou seja, desprezando a dissipação viscosa, a equação da conservação da quantidade de movimento na chaminé fica:

$$\left(\frac{\partial \rho w^2}{\partial z}\right) = \frac{\partial p}{\partial z} - (\rho - \rho_{atm})g \quad (3.80)$$

Como a velocidade no interior da chaminé é constante, organizando a equação 3.80 para sua integração, tem-se:

$$\frac{\rho w^2}{2} = \frac{\partial p}{\partial z} dz - (\rho - \rho_{atm})g dz \quad (3.81)$$

Integrando a equação 3.81 entre os pontos 4 e 5 da Figura 3.3, ao longo do comprimento da chaminé, considerando que o fluxo de massa é constante, mas, devido à diferença de massa específica do ar, sua velocidade não o é, tem-se,:

$$\frac{\rho w^2}{2} = \int_0^{H_{ch}} (\rho_{atm} - \rho) g dz - \Delta p_{total} \quad (3.82)$$

e resolvendo a equação (3.82) para a velocidade, obtém-se:

$$w = \sqrt{\frac{2}{\rho} \left( \int_0^{H_{ch}} (\rho_{atm} - \rho) g dz - \Delta p_{total} \right)} \quad (3.83)$$

Onde  $\Delta p_{total}$  considera a perda global de carga no sistema.

Com base no trabalho experimental de Schlaich (1983), a temperatura na saída da chaminé pode ser calculada conforme a expressão:

$$T_z = T_e \left( 1 - \frac{k-1}{k} \left( \frac{z}{H_{ch}} \right) \right) \quad (3.84)$$

onde  $k$  é o valor da razão de calores específicos, e para o ar vale 1,4005.

A presença da chaminé proporciona que o escoamento aquecido produzido pelo coletor seja transformado em energia cinética (corrente convectiva) e energia potencial. Assim, a diferença de massa específica causada pelo aumento da temperatura no coletor atua como força motriz. A massa de ar com menor massa específica na base da chaminé é conectada com a atmosfera vizinha no topo da torre, e desta forma adquire empuxo. Esta diferença de pressão é expressa por:

$$\Delta p_{total} = \frac{\rho w^2}{2} + \Delta p_{turb} \quad (3.85)$$

Sabendo que a queda de pressão na turbina é função da variação de pressão total multiplicada por um fator na turbina, tem-se:

$$\Delta p_{turb} = x \Delta p_{total} \quad (3.86)$$

Substituindo a equação (3.86) na equação (3.85) e isolando a variação total de pressão, tem-se:

$$x \Delta p_{total} = \Delta p_{total} - \frac{\rho w^2}{2} \quad (3.87)$$

e isolando, a velocidade  $w$ , surge-se:

$$\frac{\rho w^2}{2} = (1 - x) \Delta p_{total} \quad (3.88)$$

Sabendo que a diferença total de pressão no sistema pode ser definida como o acréscimo da pressão dinâmica sem uma turbina instalada no sistema (onde então a diferença de pressão estática é considerada nula), a mesma pode ser definida por:

$$\Delta p_{total} = \frac{\rho w_{livre}^2}{2} \quad (3.89)$$

e a equação (3.89) substituída na equação (3.88), chega-se à:

$$w = w_{livre} \sqrt{(1 - x)} \quad (3.90)$$

A velocidade  $w_{livre}$  é a velocidade máxima que seria obtida sem a presença da turbina. Tal velocidade é calculada como se não houvesse perdas por atrito. Para calcular a velocidade,

recorre-se a conservação da quantidade de movimento (Eq. 3.80), porém, utilizando a aproximação de Boussinesq.

O termo de empuxo, devido a diferença de densidade, é obtido considerando a aproximação de Boussinesq, que é uma linearização da dependência da densidade em função da temperatura. A aproximação de Boussinesq é amplamente utilizada na modelagem numérica e matemática de problemas de convecção natural. Segundo Gray e Giorgini (1976), a aproximação de Boussinesq é fisicamente consistente e facilita a solução do problema. Esta aproximação considera o fluido incompressível em todo o sistema, exceto no termo de empuxo da equação de movimento na direção  $z$ . Para determinar uma expressão matemática para esta componente vertical da velocidade em  $z$ , considera-se uma massa específica  $\rho_\infty$  a uma temperatura correspondente  $T_\infty$ .

Conforme Gray e Giorgini (1976), a aproximação de Boussinesq conduz a uma expressão para a densidade na forma:

$$\rho = \rho_\infty [1 - \beta(T - T_\infty)] \quad (3.91)$$

Onde, para gases ideais, o coeficiente de expansão volumétrica,  $\beta$ , é:

$$\beta = \frac{1}{T_\infty} \quad (3.92)$$

Sendo  $T_\infty$  expresso em K.

Com base na equação da quantidade de movimento em  $z$  (Eq. 3.80), utilizando as hipóteses já estabelecidas, para a velocidade livre do fluxo de ar (sem a interferência da turbina, tem-se que:

$$w_{livre} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \left( \int_0^{H_{ch}} (\rho_{atm} - \rho) g dz \right)} \quad (3.93)$$

Integrando a equação (3.93) de 0 a  $H_{ch}$ , tem-se:

$$w_{livre} = \sqrt{\frac{2g(\rho_{atm} - \rho)}{\rho} \int_0^{H_t} dz} \quad (3.94)$$

$$w_{livre} = \sqrt{\frac{2g(\rho_{atm} - \rho)H_t}{\rho}} \quad (3.95)$$

E partindo da hipótese de Boussinesq dada pela equação 3.91, onde:

$$\frac{\rho_{atm} - \rho}{\rho} = \frac{(T - T_\infty)}{T_\infty} \quad (3.96)$$

Então,

$$w_{livre} = \sqrt{2g\beta H_t(T - T_\infty)} \quad (3.97)$$

Porém, utilizando a Eq. 3.92, tem-se que

$$w_{livre} = \sqrt{\frac{2gH_t(T - T_\infty)}{T_\infty}} \quad (3.98)$$

Note que  $T$  é a temperatura na saída do coletor, ou seja, no início da chaminé, e é a maior temperatura obtida.

Desta forma, a velocidade máxima real na planta considerando a perda de carga na turbina é expressa por:

$$w = \sqrt{\frac{2gH_t(T - T_\infty)(1 - x)}{T_\infty}} \quad (3.99)$$

Sabe-se que a potência produzida por uma máquina de fluxo, conforme Fox e McDonald (1995) é dada pelo produto da vazão, queda de pressão na turbina e sua eficiência:

$$\dot{W} = \Delta p_{turb} \dot{V} \eta_{turb} \quad (3.100)$$

Como a vazão volumétrica é dada pelo produto da área pela velocidade, equação (3.99), obtém-se:

$$\dot{W} = x \Delta p_{total} A_{ch} \sqrt{\frac{2gH_t(T - T_\infty)(1 - x)}{T_\infty}} \eta_{turb} \quad (3.101)$$

Aplicando na equação (3.101) a diferença de pressão total obtida pela substituição da velocidade da corrente livre dada pela equação (3.98) na equação (3.89), tem-se:

$$\dot{W} = x \left( \frac{\rho g H_t (T - T_\infty)}{T_\infty} \right) A_{ch} \sqrt{\frac{2 g H_t (T - T_\infty) (1 - x)}{T_\infty}} \eta_{turb} \quad (3.102)$$

Reescrevendo de outra maneira, chega-se à:

$$\dot{W} = \rho A_{ch} \sqrt{2 \left( \frac{g H_{ch} (T - T_\infty)}{T_\infty} \right)^3} \eta_{turb} x \sqrt{(1 - x)} \quad (3.103)$$

Onde  $A_{ch}$  ( $m^2$ ) é a área da seção da chaminé.

O calor total absorvido pelo ar pode ser modelado pelo balanço de energia no volume de controle. Para situações em regime permanente onde a hipótese de variação de energia cinética e potencial pode ser desprezível, o calor pode ser modelado como:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_s - h_e) \quad (3.104)$$

onde  $h_s$  e  $h_e$  representam a entalpia na saída e a entalpia na entrada, respectivamente.

Utilizando a definição de calor específico a pressão constante, tem-se:

$$c_P = \frac{dh}{dT} \quad (3.105)$$

E integrando a equação (3.105) da entrada até a saída, chega-se a expressão:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_P (T - T_\infty) \quad (3.106)$$

Como visto anteriormente, tanto a potência como o calor absorvido são funções da temperatura ambiente, e da temperatura alcançada pelo coletor. Esta temperatura alcançada pelo coletor interfere significativamente na precisão dos resultados esperados, e demanda uma análise cuidadosa e detalhada. Esta análise leva em conta vários aspectos, como a parcela de calor transmitida pela cobertura vítrea, e o balanço realizado em todo o sistema, considerando ainda o calor absorvido pelo solo.

Conforme Schlaich (1995), sabendo que a potência máxima (sem perdas) é dada pelo produto  $\frac{1}{2}\dot{m}w^2$  e o calor utilizado pela equação 3.106, eficiência de uma chaminé solar é dada pela equação (3.107):

$$\eta = \frac{g_z H_t}{c_p T_\infty} \quad (3.107)$$

Esta equação (3.107) explica uma das características básicas de uma chaminé solar, onde a eficiência é fundamentalmente dependente apenas de sua altura. De acordo com Schlaich (1995), para alturas de 1000 m, o desvio encontrado em comparação com a solução analítica, usando a aproximação de Boussinesq, é desprezível.

Para condições normais de temperatura e pressão, 20°C e 1 bar, respectivamente, a equação (3.107) fornece que para uma chaminé considerada alta, por exemplo 1000 m, a eficiência de uma chaminé solar atinge aproximadamente 3,3%. Considerando uma eficiência do coletor na ordem de 60%, por exemplo, e uma eficiência da turbina na ordem de 80%, a eficiência real da planta cai para 1,6%. Parece extremamente baixo, mas é devido a este fato que uma grande área de coletor faz-se necessária. Desta forma, para cada 500 W que incide no coletor, por exemplo, apenas 8 W são gerados. É fácil de concluir que quanto maior a área do coletor, maior a potência gerada.

### 3.2.1 Modelo de Koonsrisuk *et al.* (2010)

Koonsrisuk *et al.* (2010) propõem um novo modelo para o cálculo da velocidade da corrente de ar dentro da chaminé solar.

O modelo é baseado na soma das perdas de carga do conjunto, entre elas a perda de carga abaixo do coletor, a perda devida à aceleração decorrente da redução do raio do coletor e ainda a perda de carga na chaminé. Como Koonsrisuk *et al.* (2010) não consideraram a perda de carga na turbina, a velocidade encontrada será a da corrente livre, para ser posteriormente incluída na equação 3.90. Os autores também simplificaram a quantidade de calor absorvido pela corrente, considerando que toda a radiação solar incidente no coletor é absorvida pela corrente de ar. Para o modelo de Koonsrisuk *et al.* (2010), o modelo já fundamentado para o acréscimo de temperatura será utilizado.

Partindo da diferença global de pressão decorrente do aquecimento do ar no interior do coletor tem-se:

$$\Delta P = \rho g H_{ch} \beta (T - T_{\infty}) \quad (3.108)$$

Esta diferença deve ser igual à soma das perdas de carga em todo o sistema.

A primeira perda encontrada é no interior da chaminé:

$$\Delta P_y \pi R^2 = \tau_w 2\pi R H_{ch} \quad (3.109)$$

Onde  $\tau_w$  é a tensão de cisalhamento na parede da chaminé e  $\Delta P_y$  é a perda de carga na chaminé. Esta tensão de cisalhamento é definida como:

$$\tau_w = f_y \frac{1}{2} \rho u_y^2 \quad (3.110)$$

Combinando as equações (3.110) e (3.109), tem-se:

$$\Delta P_y = f_y \frac{H_{ch}}{R} \rho u_y^2 \quad (3.111)$$

onde

$$u_y = \frac{\dot{m}}{\rho \pi R^2} \quad (3.112)$$

Para a perda de carga do fluido que escoar abaixo do coletor (entre a cobertura vítrea e o solo), tem-se:

$$\Delta P_x \pi D_c h = 2\tau_w \frac{\pi D_c^2}{4} \quad (3.113)$$

Onde  $\tau_w$  na equação (3.113) é a tensão de cisalhamento no solo,  $D_c$  é o diâmetro do coletor e a tensão de cisalhamento é aplicada nas duas áreas (solo e vidro). Isolando  $\Delta P_x$ , tem-se:

$$\Delta P_x = f_x \frac{D_c}{4h} \rho u_x^2 \quad (3.114)$$

onde

$$u_x = \frac{\dot{m}}{\rho \pi D_c h} \quad (3.115)$$

Para a perda de carga devido à aceleração do fluido, decorrente da redução da área de passagem do ar, a diferença de pressão é dada por:

$$dP = \frac{\rho U^2}{(1 - M^2)} \left( \frac{dA_c}{A_c} - \frac{q'' dA_c}{\dot{m} c_p T} \right) \quad (3.116)$$

A próxima hipótese sugerida por Koonsrisuk *et al.* (2010) é que  $q''$ ,  $c_p$ ,  $\rho$  e  $T$  são aproximadamente constantes. O número de Mach,  $M$ , é desprezível, e a equação (3.116) se reduz a:

$$\Delta P_{ac} = \frac{\dot{m}^2}{2\rho} \left( \frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) - \frac{\dot{m} \cdot q}{2\pi h^2 \rho c_p T_\infty} \ln \left( \frac{D_c}{2R} \right) \quad (3.117)$$

Koonsrisuk *et al.* (2010) consideram ainda que o segundo termo da equação (3.117) é desprezível, e como  $A_1^2 \gg A_2^2$ , a equação (3.117) se torna:

$$\Delta P_{ac} \cong \frac{8\dot{m}^2}{\pi^2 D_c^4 \rho} \quad (3.118)$$

Igualando a diferença total de pressão com a soma das perdas de carga

$$\Delta P = \Delta P_y + \Delta P_x + \Delta P_{ac} \quad (3.119)$$

Ou

$$gH_{ch} \frac{(T - T_\infty)}{T_\infty} = f_y \frac{H_{ch}}{\rho^2 R_{ch}} \left( \frac{\dot{m}}{\pi R_{ch}^2} \right)^2 + f_x \frac{D_c}{4\rho^2 h} \left( \frac{\dot{m}}{\pi D_c h} \right)^2 + \frac{8}{\rho^2} \left( \frac{\dot{m}}{\pi D_c^2} \right)^2 \quad (3.120)$$

A equação (3.120), decorrente da soma das perdas de carga, pode ser utilizada para, iterativamente, junto com o delta de temperatura, se obter a vazão mássica e consequentemente a velocidade livre do escoamento.

Resolvendo para a velocidade livre do escoamento:

$$w_{livre} = \sqrt{\frac{gH_{ch}(T - T_\infty)}{T_\infty \left( \frac{f_y H_{ch}}{R} + \frac{f_x R^4}{4h^3 D_c} + \frac{8R^4}{D_c^4} \right)}} \quad (3.121)$$

Associando a equação (3.121) com a equação (3.90), obtém-se:

$$w = \sqrt{\frac{gH_{ch}(T - T_\infty)(1 - x)}{T_\infty \left( \frac{f_y H_{ch}}{R} + \frac{f_x R^4}{4h^3 D_c} + \frac{8R^4}{D_c^4} \right)}} \quad (3.122)$$

O modelo de Koonsrisuk *et al.* (2010), que envolve o emprego da soma das perdas de carga no sistema para prever o fluxo de massa de ar na chaminé, e o modelo de Bernardes *et al.* (2003), que utiliza a conservação da quantidade de movimento e a equação de Euler para

prever este mesmo fluxo de massa na chaminé, e que foram apresentados neste capítulo, serão analisados doravante neste trabalho, e comparados com as modificações propostas e fundamentadas no que diz respeito às múltiplas reflexões no material vítreo e na interface solo/coletor. Ainda, para o modelo de Koonsrisuk *et al.* (2010), uma modificação extra é apresentada nos capítulos seguintes, onde novas perdas de carga propostas por Von Backström *et al.* (2006) são inseridas no modelo.

Além da análise destes modelos, é proposto verificar o potencial energético adicional de módulos fotovoltaicos atuando paralelamente com a chaminé solar. E ainda mais, verificar qual o melhor posicionamento destes módulos na planta é essencial para otimizar esta geração secundária de energia. A fundamentação teórica para esta tecnologia é apresentada a seguir.

### 3.3 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Para os modelos que utilizam módulos fotovoltaicos em conjunto com a chaminé solar, uma análise do posicionamento, eficiência, e demais fatores que comprometem o seu uso deve ser realizada. Tais fatores são descritos a seguir.

#### 3.3.1 Posicionamento

O uso das células fotovoltaicas para o aumento da eficiência da planta depende fortemente da posição onde são aplicadas. A Figura 3.11 mostra um esquema construtivo de uma célula fotovoltaica.

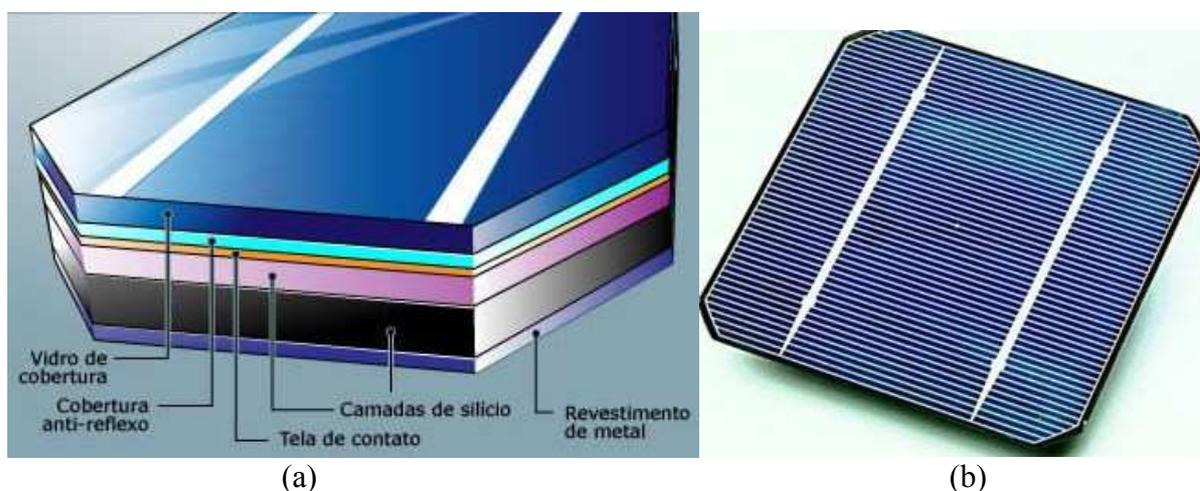


Figura 3.11: (a) Componentes de uma célula fotovoltaica e (b) célula comercial

Fonte: <http://electro-engenhocas.blogspot.com/2009/09/celulas-fotovoltaicas.html> (2009)

Como as células são produzidas com silício e revestimentos metálicos, que são opacos a radiação, a única forma de aplicar em conjunto com uma chaminé solar é aplicá-las abaixo do coletor, e não acima, visto que se forem aplicadas sobre o coletor elas não permitem a passagem de radiação solar para o escoamento de ar entre o solo e o coletor. A posição analisada para os módulos fotovoltaicos é paralela ao solo, de modo a não prejudicar o escoamento de ar abaixo do coletor. Uma vantagem de posicioná-las entre a cobertura vítrea e o solo é justamente o fluxo de ar gerado pelo sistema, que promove um aumento no coeficiente de convecção e conseqüente redução da temperatura dos módulos. Um detalhe de como os módulos fotovoltaicos são dispostos abaixo da cobertura vítrea pode ser observada na Figura 3.12. Nota-se a posição horizontal, paralela à cobertura vítrea e na posição horizontal, estática.

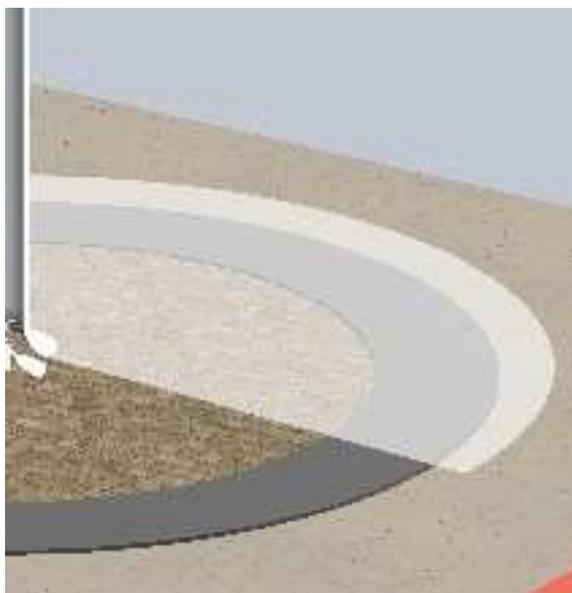


Figura 3.12: Detalhe do posicionamento dos módulos fotovoltaicos em relação ao coletor

Conforme a Comissão de Energia da Califórnia (2001), para cada metro quadrado de instalação de células fotovoltaicas em residências, uma geração de  $54 \text{ W/m}^2$  a  $108 \text{ W/m}^2$  pode ser esperada. A correlação com o modelo utilizado em uma planta e uma residência faz sentido devido às células serem estacionárias, e não acompanharem o percurso solar, como em plantas destinadas apenas para este propósito. Como as células ficam abaixo do coletor, não é possível arranjá-las de maneira a acompanharem o percurso solar, pois necessitariam de uma altura do coletor significativa e ainda provocariam uma perda de carga desnecessária no escoamento.

### 3.3.2 Estimativa de eficiência e potência

As células fotovoltaicas produzem potência em proporção à intensidade da radiação solar incidente na superfície. A intensidade de luz na superfície varia durante o dia, assim como dia após dia, de maneira que a potência gerada de um sistema fotovoltaico pode variar substancialmente. Existem outros fatores que afetam consideravelmente o desempenho das células, que são abordados a seguir.

Para iniciar uma análise dos fatores que afetam o desempenho de células fotovoltaicas, é necessário estabelecer condições de teste padrão (CTP), que podem facilmente ser recriadas pelo fabricante dos módulos. De acordo com a comissão de energia da Califórnia (2001), as CTP são definidas com temperatura da célula a 25°C, radiação solar de 1000 W/m<sup>2</sup> (refere-se à intensidade de pico) e uma incidência normal.

Um fabricante pode rotular um módulo com potência de saída na ordem de 100 W de potência sob CTP, e identifica-lo com o nome de “módulo de 100 W”. Este módulo possui uma tolerância de ± 5% do nominal, o que significa que pode gerar 95 W e ainda assim ser chamado de módulo de 100 W.

A potência gerada sofre uma queda conforme a temperatura do módulo cresce. Conforme especificado pela comissão de energia da Califórnia (2001) e também por Andrade (2008), a temperatura que atinge uma célula fotovoltaica em operação chega facilmente aos 50 a 60°C. A Figura 3.13 mostra uma curva padrão de tensão (V) versus corrente (I) de um estudo realizado por Andrade (2008) em função das temperaturas dos módulos fotovoltaicos.

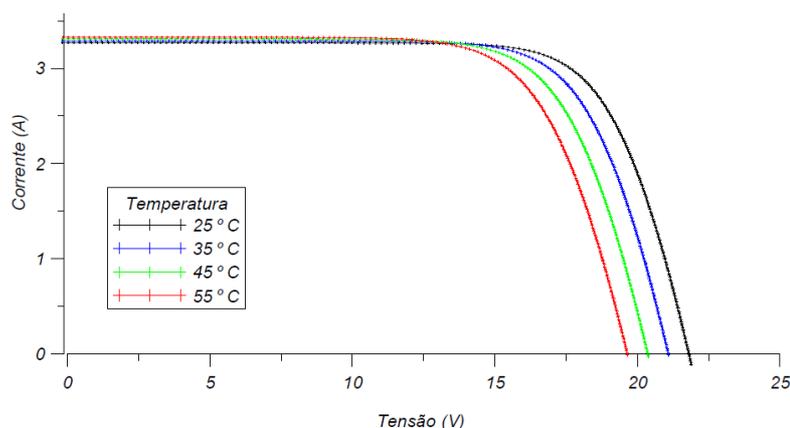


Figura 3.13: Efeito da temperatura na corrente e tensão geradas por um módulo fotovoltaico

Fonte: Andrade (2008)

Para módulos fotovoltaicos, conforme Skoplaki e Palyvos (2009), a eficiência devido à temperatura da célula é dada pela eq. 3.123:

$$\eta_{temp} = 1 - \beta_{ref}(T_{cel} - T_{ref}) \tag{3.123}$$

onde  $\eta_{temp}$  é a eficiência devido à temperatura da célula fotovoltaica e  $\beta_{ref}$  é o coeficiente de temperatura, dado pela equação (3.124):

$$\beta_{ref} = \frac{1}{T_0 - T_{ref}} \tag{3.124}$$

onde  $T_{ref}$  a temperatura de CTP da célula e  $T_0$  a temperatura onde a geração da célula fotovoltaica tende a zero, que no caso de uma célula monocristalina é 270°C.

Para o cálculo da temperatura da célula fotovoltaica, um balanço de energia é realizado considerando a rede térmica mostrada na Figura 3.14, utilizando os coeficientes de transferência de calor por convecção previamente calculados para as seções do coletor, na posição desejada de instalação dos módulos abaixo do coletor.

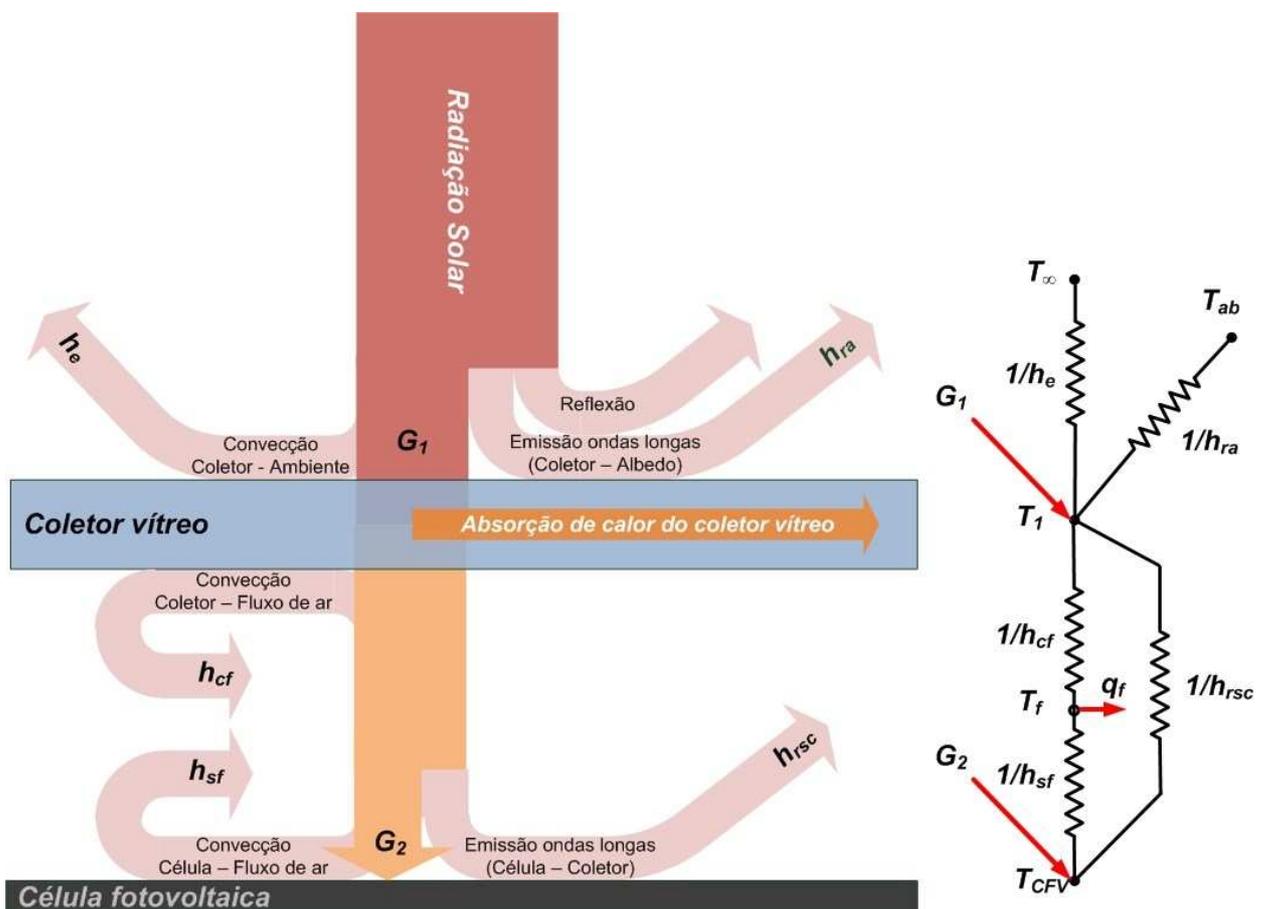


Figura 3.14: Fluxo de energia (coletor e célula fotovoltaica) e circuito térmico equivalente

Justamente pelo fato dos módulos fotovoltaicos possuírem uma melhor eficiência a uma temperatura mais baixa, a intenção é manter a sub-planta de geração combinada fotovoltaica na periferia do coletor solar, conforme já mostrado na Figura 3.2.

Conforme a Comissão de Energia da Califórnia (2001), durante um ano de operação, é esperada uma redução na potência na ordem de 7% devido ao acúmulo de poeira e sujeira sobre os módulos. Outras reduções esperadas são de 5% devido à perda pela transmissão de energia elétrica e 10% na conversão de corrente contínua para alternada.

Desta forma, um módulo padrão de 100 W, se levado em conta todas as perdas embutidas na sub-planta de geração através de células fotovoltaicas, gera cerca de 67 W. Caso utilizem-se sistemas de baterias para acúmulo de energia para utilização em períodos sem radiação solar, 10% de perda pode ser considerado devido aos efeitos de armazenamento, reduzindo a geração para 60,5 W.

Outro fator que gera perdas, segundo a Comissão de energia da Califórnia (2001), é o fato dos módulos serem estacionários, e não permitirem o acompanhamento dos painéis ao movimento do Sol. O fator de queda, nestes casos, chega a 11%, para uma orientação horizontal.

Todas as perdas indicadas acumulam uma eficiência de outras perdas na ordem de 63,7%. Esta eficiência deve ser ainda multiplicada pela eficiência do módulo utilizado e pela eficiência devido à temperatura, para então obter-se a eficiência global da planta.

Existem diversos fabricantes de módulos fotovoltaicos. Para este trabalho, utilizou-se dados de Donauer Solar Systems (2010). Dentre as diversas marcas de módulos, a que mais se destacou foi a Sanyo HIT monocristalina, que possui uma eficiência informada pelo fabricante de 17,1% de seu módulo fotovoltaico de 210 W.

Desta forma, a potência gerada pela sub-planta fotovoltaica deve seguir a seguinte expressão:

$$\dot{W}_{fv} = \eta_{temp} \eta_{perdas} \eta_{módulo} G T_c A_{módulos} \quad (3.125)$$

### 3.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo foram definidos os modelos matemáticos propostos para a análise.

No modelo adotado por Bernardes *et al.* (2003), esta fundamentação teórica abrange o acréscimo de temperatura provido pelo coletor e a velocidade que a corrente de ar pode adquirir na chaminé no intuito de geração de potência, e quanto ao modelo de Koonsrisuk *et al.* (2010), fica fundamentada a proposta da inclusão de perdas de carga para prever a velocidade da corrente livre que o escoamento de ar pode alcançar.

O modelo de múltiplas reflexões em um material vítreo foi fundamentado conforme Strobel (2007), e uma nova abordagem incluindo as múltiplas reflexões entre o coletor e o solo foi proposta.

Para verificar o potencial energético do uso de módulos fotovoltaicos para a geração paralela de energia, um modelo foi proposto, incluindo as perdas sofridas por um módulo fotovoltaico, em especial a influência da temperatura na eficiência da célula, fornecida por Skoplaki e Palyvos (2009), sendo esta eficiência de grande importância para o trabalho, pois a localização das células fotovoltaicas no interior do coletor afeta diretamente a temperatura dos módulos e conseqüentemente a geração de energia.

Com as informações apresentadas neste capítulo, é possível partir para o desenvolvimento e validação do software para a simulação computacional.

## 4 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos descritos é necessário realizar uma investigação da incidência solar no território brasileiro. Com base nestes dados, pode ser feita uma análise em cada uma das cinco regiões brasileiras e por fim concentrar os estudos na melhor localização para a implantação deste tipo de usina. Para tanto, é utilizado um software desenvolvido pela Universidade Federal de Pernambuco, pelo Grupo de Pesquisa em Fontes Alternativas de Energia, denominado “Atlas Solarimétrico do Brasil”. Este atlas contém uma base de dados com mais de 500 estações localizadas no Brasil e nas regiões limítrofes dos países vizinhos. São informações sobre radiação solar global diária e insolação diária, com valores extraídos em pesquisa de referencial teórico no ano de 2003. Estas informações fornecem os dados de entrada para as simulações realizadas em chaminés solares de diferentes geometrias e em determinadas regiões do Brasil.

Muito dependente da posição de inserção das turbinas eólicas, outro fator importante que deve ser levado em conta nas simulações é a perda de carga na turbina. Neste aspecto, é considerado no cálculo da vazão mássica de ar a queda de pressão na turbina, conforme dados da literatura corrente.

Com base nos modelos de gás ideal, na distribuição de pressão em um fluido, no empuxo, nas correlações de convecção em escoamentos externos, e no balanço de massa e energia em um volume de controle pode-se definir o fluxo de massa de ar que passa pela chaminé. Desta forma a geração de potência desta planta é determinada. Escolhido o modelo matemático para análise, o mesmo é validado com base nos resultados da literatura.

Um estudo é conduzido no sentido de verificar a influência do uso de células fotovoltaicas na eficiência energética da planta. De forma a não perturbar o escoamento, as placas são modeladas junto ao plano do solo e, devido ao fato de suas eficiências variarem com a temperatura de operação, sua posição em relação ao coletor também é analisada.

Após o modelo matemático ser validado, é realizado um estudo sobre a influência de alguns fatores geométricos na potência de saída da usina, utilizando como ferramenta de análise um código computacional desenvolvido em C++.

Como o objetivo é analisar o potencial energético de chaminés solares no Brasil, limita-se este estudo a mapear a potência gerada com o uso de chaminés solares “simples” e chaminés solares com geração combinada de energia por meio de células fotovoltaicas apenas em território brasileiro.

O programa computacional deve fornecer os valores de temperatura, velocidade do fluxo de ar e a potência gerada para cada passo de tempo durante um dia inteiro. A linguagem de programação adotada foi o C++, que é amplamente utilizada em problemas técnicos e científicos.

As equações já apresentadas que governam o fenômeno não possuem uma solução analítica, visto a necessidade de inúmeras iterações para que o problema atinja uma convergência, de modo que a solução numérica deve ser utilizada. Assim, a hora do dia foi fracionada em intervalos menores de tempo, assim como o comprimento do coletor foi fracionado de modo a obter um número finito de elementos. Isto leva a abordagem descontínua, ou seja, em regime semi-permanente, conforme descrito nas seções anteriores. O refino no tempo e no espaço não pode gerar muitos elementos, pois aumentam o tempo computacional. Como o modelo numérico é validado com base nos dados de Haaf (1986) obtidos na planta experimental de Manzanares, e a mesma foi instrumentada de modo a fornecer dados a cada 600 segundos, este será o passo de tempo utilizado então.

Um dos principais problemas encontrados em utilizar softwares comerciais<sup>4</sup> de DFC (Dinâmica dos Fluidos Computacional) para simular chaminés solares está na condição de contorno para o solo. Existem algumas limitações nas condições de contorno predefinidas pelos softwares. Apesar destas limitações, é possível programar dentro de alguns softwares comerciais de DFC a condição de contorno variável com o espaço ou tempo, porém, exigindo tempo igual ou superior à confecção de um software próprio. Com uso de um software próprio, tem-se a vantagem de possuir completo controle sobre a simulação.

Para uma melhor compreensão do código computacional desenvolvido para a realização das simulações, apresenta-se a seguir uma descrição das etapas do código.

#### 4.1 DOMÍNIO FÍSICO

O domínio físico do objeto de estudo é mostrado pela Figura 4.1. Nota-se que a chaminé não é discretizada, visto a velocidade do fluxo de ar depender apenas da altura da chaminé e da temperatura máxima alcançada pelo coletor, conforme discutido no capítulo anterior. Desta forma, o único componente onde uma análise de diferenças finitas deve ser conduzida é o coletor, abaixo do qual o fluxo de ar sofre um aquecimento que varia conforme o mesmo avança para o centro da chaminé.

---

<sup>4</sup> Um software comercial amplamente utilizado para análises de dinâmica dos fluidos computacional é o Ansys CFX<sup>®</sup>

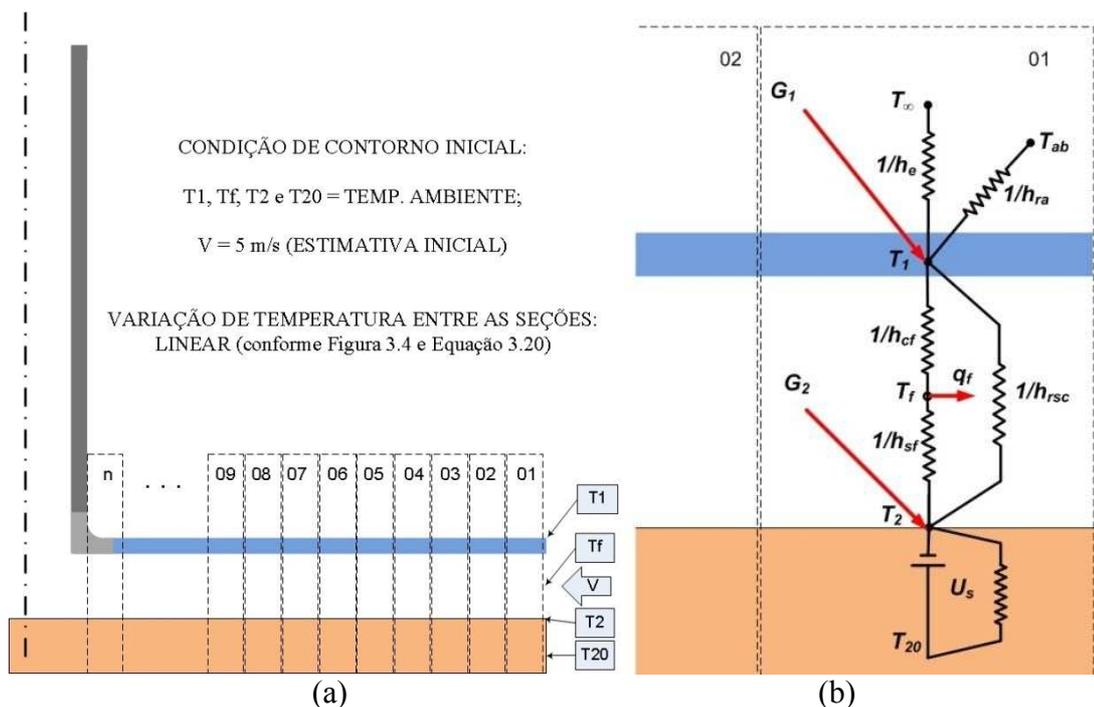


Figura 4.1: (a) Domínio físico/condições de contorno e (b) Detalhe de um elemento.

O procedimento matemático e numérico sobre o domínio físico é descrito a seguir pelo algoritmo de solução.

## 4.2 ALGORITMO DE SOLUÇÃO

O funcionamento do código computacional é apresentado em etapas, de maneira a facilitar o entendimento do mesmo.

### Etapa 1: Dados de entrada.

Nesta etapa devem ser fornecidos os parâmetros geométricos da planta que se deseja analisar, tais como o diâmetro do coletor, altura da chaminé, altura do coletor em relação ao solo e raio da chaminé.

Uma vez definida a geometria da mesma, as propriedades térmicas e físicas do solo e do ar são também fornecidas, além dos parâmetros ópticos do vidro, que envolve a espessura do material da cobertura, o coeficiente de extinção e a refletividade.

Os dados geográficos, como a latitude do local a ser analisado e a data da simulação são fornecidos, de modo a permitir o cálculo do ângulo de incidência solar.

As condições climáticas da região como função horária são inseridas, tais como radiação solar e temperatura ambiente, para alimentarem o programa em cada passo de tempo.

O critério de convergência para temperatura e para velocidade do ar, de modo a estabelecer um valor no qual a diferença entre os valores encontrados entre uma iteração e outra seja considerada satisfatória, são estabelecidos.

O número de elementos no qual o coletor é dividido é também um fator a ser definido.

### **Etapa 2: Processamento.**

Primeiramente, o programa computacional deve dividir o raio do coletor no número finito de elementos fornecido. Este modelo teórico assume que para um pequeno coletor, as temperaturas dos contornos ao redor do escoamento de ar para uma pequena seção são uniformes e a temperatura do escoamento de ar varia linearmente nesta região.

As propriedades ópticas do coletor são calculadas com base na latitude, hora solar, declinação solar, refração e múltiplas reflexões, retornando, desta forma, a transmissividade, dada pela equação (3.39) a ser utilizada pelo modelo de Bernardes *et al.* (2003) e a fração refletida, absorvida e transmitida pelo coletor, proposta por este trabalho, na modificação dos modelos de Bernardes *et al.* (2003) e de Koonsrisuk *et al.* (2010), dadas pelas equações (3.46), (3.49) e (3.52), respectivamente.

De forma a ser possível o cálculo do coeficiente de transferência de calor por radiação com o albedo, a temperatura do albedo, dada pela equação (3.56) é calculada com base na temperatura ambiente, temperatura de orvalho e hora do dia.

### **Etapa 2 (a): Condições de contorno e processo iterativo.**

Um valor inicial é estimado para a velocidade na entrada da seção 1, por exemplo, 5m/s. Desta forma é possível estimar os coeficientes de transferência de calor por convecção. Como se trata de uma estimativa inicial, após o fechamento do cálculo do acréscimo de temperatura, uma nova vazão mássica e conseqüente velocidade na entrada é determinada.

O código atribui, como temperatura da superfície do solo, coletor, fluido sob o coletor e subsolo a temperatura ambiente para o passo tempo inicial de simulação. Estas não são as temperaturas reais para esta hora do dia, visto que o solo absorve calor durante o dia e libera-o a noite, devendo, portanto, o programa realizar a simulação para mais de um dia, para que a convergência ocorra e o ruído dos parâmetros iniciais arbitrados não influa no resultado final.

Esta metodologia é a mesma utilizada por Bernardes *et al.* (2003), e está especificada na Figura 4.1 (a) .

Os coeficientes de transferência de calor são calculados com base no comprimento de seção, temperaturas, e velocidade na seção. Estes coeficientes são mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Coeficientes de transferência de calor

<b>Coeficiente de transferência de calor</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Equação</b>
De convecção na parte externa do coletor	$h_e$	(3.61)
De radiação entre o coletor e o albedo	$h_{ra}$	(3.55)
De radiação entre o solo e o coletor	$h_{rsc}$	(3.57)
De convecção entre o coletor e o escoamento de ar	$h_{cf}$	(3.62) a (3.68)
De convecção entre o solo e o escoamento de ar	$h_{sf}$	(3.62) a (3.68)
De condução transiente no solo	$U_s$	(3.74)

O cálculo matricial é iniciado, para obtenção das novas temperaturas da superfície do solo, coletor e do fluido sob o coletor. O procedimento anterior é repetido até atingir o critério de convergência estabelecido. Uma vez alcançado o critério de convergência, o programa armazena o valor das temperaturas em vetores para posterior utilização. A temperatura da superfície do solo,  $T_2$  é utilizada especialmente para servir como temperatura do subsolo ( $T_{2,0}$ ) em um passo tempo posterior.

Alcançada a convergência das temperaturas para a seção em análise, a temperatura do fluido,  $T_f$ , é considerado como sendo a média aritmética entre a temperatura de entrada e de saída do fluido. A temperatura de saída do fluido na primeira seção é então utilizada pelo programa como a temperatura de entrada na nova seção, o que, para a primeira seção, era a temperatura ambiente. Ao passar para a próxima seção, inicia-se novo procedimento, utilizando as temperaturas do coletor, superfície do solo e do fluido encontradas na seção anterior como iniciais para o procedimento iterativo da nova seção. Além destas considerações, como a área da seção diminui quando a seção se aproxima do centro, uma nova velocidade é calculada com base na conservação da massa.

Ao chegar à última seção analisada, uma nova velocidade é encontrada com base na equação (3.99), que leva em conta o acréscimo de temperatura no coletor, altura da chaminé e fator de queda de pressão na turbina. Com a nova velocidade, é verificada a divergência entre esta e a velocidade utilizada na iteração de velocidades anterior, visto a velocidade inicial ter sido estimada. A nova velocidade na entrada deve ser calculada pela conservação da massa, visto a velocidade calculada pela equação (3.99) ser a velocidade no centro do coletor. Os vetores de temperatura encontrados para cada elemento da chaminé foram guardados para

serem utilizados como estimativa inicial. Todo o processo se repete, desde a primeira seção, até haver a convergência na velocidade encontrada.

**Etapa 2 (b):** Cálculo dos parâmetros energéticos.

Uma vez determinada a velocidade do escoamento, é realizado o cálculo da potência gerada pela planta pela equação (3.103), em kW, que é guardada para posterior análise.

O cálculo da potência gerada, por unidade de área, pela célula fotovoltaica, é realizado com base na radiação solar, temperaturas e nos coeficientes de convecção para a posição desejada em kW, que é armazenada para posterior análise.

**Etapa 3:** Alteração do passo de tempo.

O passo de tempo é acrescido em 600 segundos, e atualizam-se os dados de entrada para a nova condição horária, e toda a análise se repete. Prossegue-se com a simulação por sete dias corridos, para eliminar flutuações na temperatura do solo devido às estimativas iniciais, e haver uma estabilização das velocidades, temperaturas e potências geradas.

**Etapa 4:** Saída dos resultados.

O programa retorna o pico de potência ocorrido no último dia de simulação, a energia gerada, em kWh durante todo o último dia e a energia gerada pelas células fotovoltaicas, em kWh durante todo o último dia, e exibe na tela os valores obtidos.

Um fluxograma, Figura 4.2, ilustra o funcionamento do código de simulação.

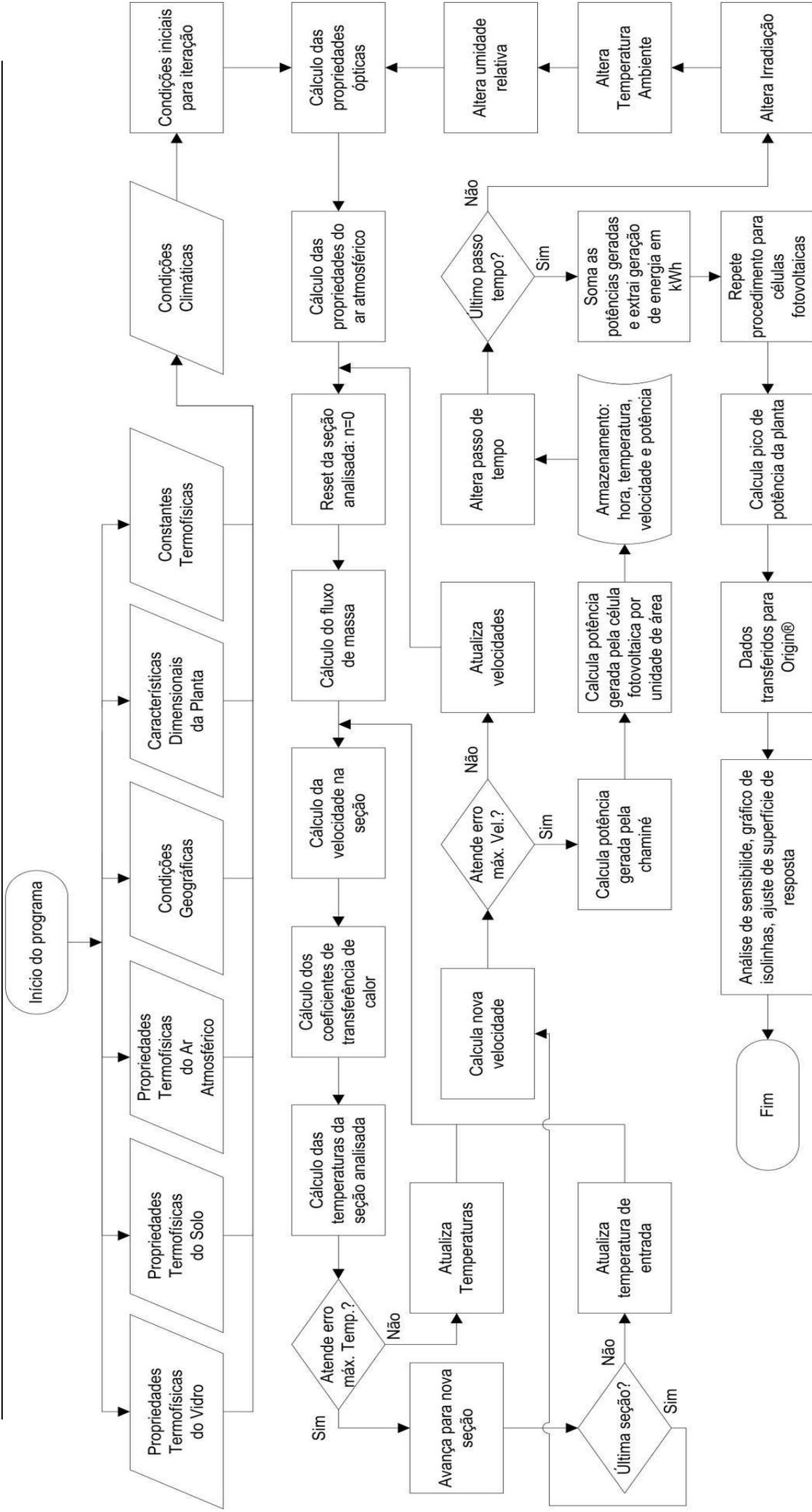


Figura 4.2: Fluxograma do procedimento computacional adotado.

### 4.3 MODELOS PARA AVALIAR ENERGIA EM CHAMINÉS SOLARES

Dentre os diversos modelos existentes na literatura, dois merecem atenção: o método de Bernardes *et al.* (2003), pela acuracidade divulgada e pela quantidade de citações e artigos científicos que utilizam tal modelo, e o método de Koonsrisuk *et al.* (2010), pela inovação proposta no modelo matemático, que utiliza a soma de perdas de carga para se determinar a velocidade da corrente livre. Partindo destes dois modelos, duas outras extensões são propostas: (i) a partir do modelo de Bernardes *et al.* (2003), considerar múltiplas reflexões no material vítreo e (ii) a partir do modelo de Koonsrisuk *et al.* (2010) também considerar múltiplas reflexões no material vítreo e também as perdas de carga secundárias relatadas por Von Backström *et al.* (2006) e mostradas no capítulo 2, que afetam a potência gerada. Estes modelos são brevemente descritos a seguir.

Quanto ao coletor, o modelo Bernardes *et al.* (2003) considera apenas a transmissividade do material vítreo do coletor, não aplicando um modelo de múltiplas reflexões no vidro e entre o coletor e o solo, como descrito no capítulo anterior.

O modelo de Koonsrisuk *et al.* (2010) é baseado na soma das perdas de carga do conjunto, como já demonstrado na fundamentação teórica deste documento (capítulo 3), entre elas: a perda de carga abaixo do coletor, a perda devido a aceleração decorrente da redução da área sob o coletor e ainda a perda de carga na chaminé. Como estes autores não consideraram a perda de carga na turbina, a velocidade encontrada será a da corrente livre, para ser posteriormente incluída na equação que considera ainda esta perda de carga como adicional, apesar de não ter sido considerada originalmente.

A primeira extensão proposta é baseada no modelo de Bernardes *et al.* (2003), porém, com alterações no modelo de transferência radiativa do sistema vidro/solo. Desta forma, o modelo segue a mesma tratativa do modelo original, com uma diferença nas parcelas de calor absorvidas pelo coletor vítreo e transmitidas para o solo, dadas pela fundamentação teórica apresentada. A validade desta proposta é discutida nos tópicos futuros.

Conforme trabalho conduzido por Von Backström *et al.* (2006), existem outras perdas de carga no sistema, não contabilizadas por Koonsrisuk *et al.* (2010). Estas perdas adicionais foram correlacionadas por Von Backström *et al.* (2006) na forma de um acréscimo no fator de queda de pressão na turbina, de modo a facilitar o tratamento das mesmas nas simulações.

Entre outras perdas de carga de menor importância, destacam-se: transição coletor-chaminé, suportes internos da chaminé, saída da chaminé e atmosfera não adiabática, gerando um acréscimo total no fator de queda de pressão na turbina na ordem de 0,97, coerente com o sugerido pela literatura. Desta forma, a segunda extensão proposta é baseada no modelo de Koonsrisuk *et al.* (2010), e conta com as mesmas características do modelo não modificado, porém, com um fator de queda de pressão na turbina de 0,97 e com o modelo de múltiplas reflexões no material vítreo e na interface solo/coletor. Sem este aumento no fator da turbina, a velocidade esperada é alta, visto não possuir todas as perdas de carga contabilizadas. Antes desta abordagem, o fator considerado era de 0,8, recomendado pela literatura.

#### 4.4 VALIDAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL

De modo a validar o código computacional desenvolvido, foram utilizados dados experimentais obtidos por Schlaich (1983), com respeito à planta piloto de Manzanares. Para tanto, nas seções seguintes são apresentados os parâmetros de teste, os dados de Schlaich (1983) e os resultados numéricos obtidos no presente trabalho.

##### 4.4.1 Dados da planta piloto de Manzanares

As propriedades do solo, cobertura vítrea e geográficas para a região de Manzanares, a fim de se validar o modelo numérico com os dados obtidos experimentalmente por Schlaich (1983), são mostradas na tabela 4.2, assim como alguns parâmetros geométricos da planta.

Tabela 4.2 Parâmetros da planta piloto de Manzanares, Schlaich (1983).

<b>Parâmetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Altura do coletor	$H_c$	4,0	m
Diâmetro do coletor	$D_c$	244,0	m
Diâmetro da chaminé	$D_{ch}$	10,0	m
Altura da chaminé	$H_{ch}$	194,0	m
Coefficiente de extinção do vidro	$\varepsilon$	32,0	1/m
Emissividade do vidro e do solo	$\varepsilon_v$	0,9	-
Condutividade térmica do solo	$k_s$	0,6	W/(mK)
Difusividade térmica do solo	$\alpha$	$2,91 \times 10^{-7}$	m <sup>2</sup> /s
Fator de queda de pressão na turbina	$x$	0,8	-
Localização	-	Manzanares	-
Latitude	$\phi_{lat}$	39,03 (Norte)	°
Data do experimento	-	08 de junho de 1987	-
Erro máximo	$err$	0,01	%
Número de seções	$num$	2000	-
Passo de tempo	$t$	600	s

Os dados experimentais de Manzanares, obtidos em 1987, pela equipe responsável pelo projeto foram disponibilizados por Weinrebe (2010), um dos integrantes da equipe, e pode ser visualizado no Anexo II deste documento. Estes dados são de extrema importância para a proposta deste trabalho, visto a necessidade de validação do modelo numérico proposto, com dados experimentais.

A Figura 4.3 mostra a velocidade máxima no interior da chaminé e a potência elétrica gerada para cada hora do dia.

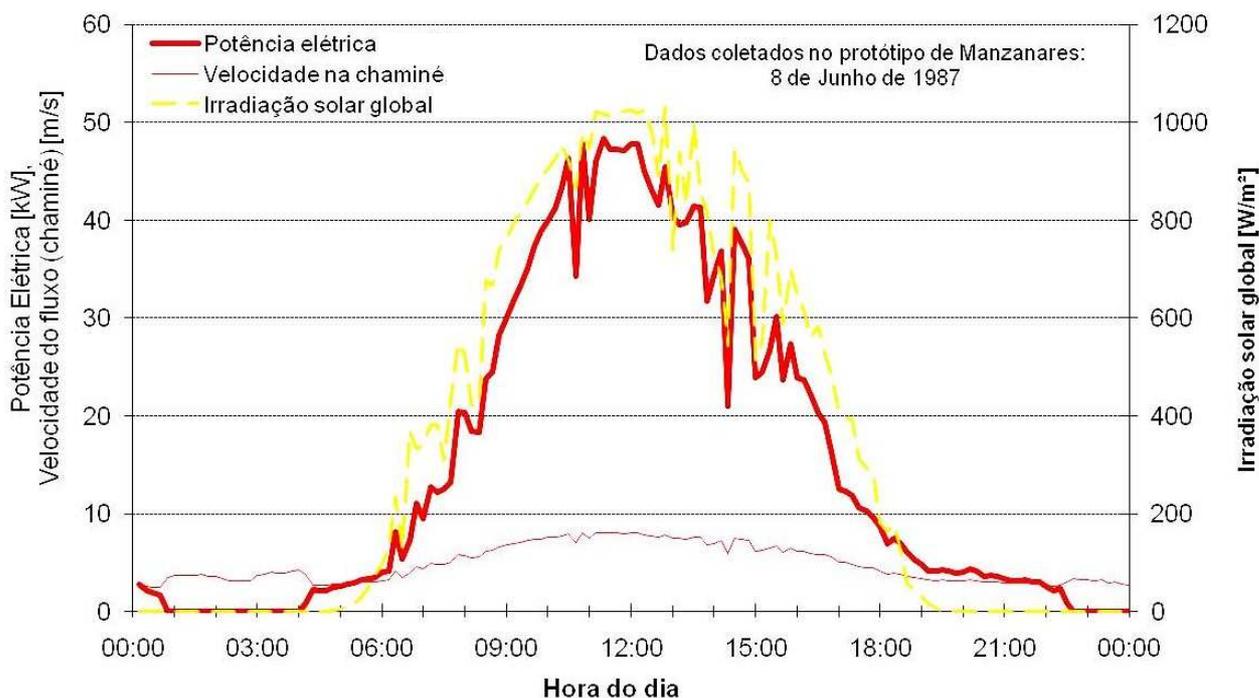


Figura 4.3: Velocidade do fluxo na chaminé e potência gerada em função da hora do dia.

Fonte: Weinrebe (2010)

Nota-se na Figura 4.2 que a potência elétrica gerada é proporcional não somente à radiação solar, mas também à velocidade do escoamento de ar no interior da chaminé. Esta velocidade, como pode ser verificada na Figura 4.2, não cessa mesmo quando não há radiação solar. Isto se deve ao fato da chaminé promover empuxo mesmo sem grande aquecimento no coletor, e também devido à influência do calor absorvido no solo durante o dia e liberado durante a noite.

Outros dados fornecidos por Weinrebe (2010) são mostrados a seguir, e são fundamentais para a correta simulação, ou seja, são dados de entrada para cada passo tempo.

A Figura 4.4 apresenta a distribuição da temperatura ambiente em Manzanares, Espanha, no dia 08 de junho de 1987. Nota-se que há uma oscilação nos valores, mas que a tendência é um comportamento senoidal, apresentando um valor mínimo próximo às 06h da manhã e um valor máximo próximo às 16h da tarde.

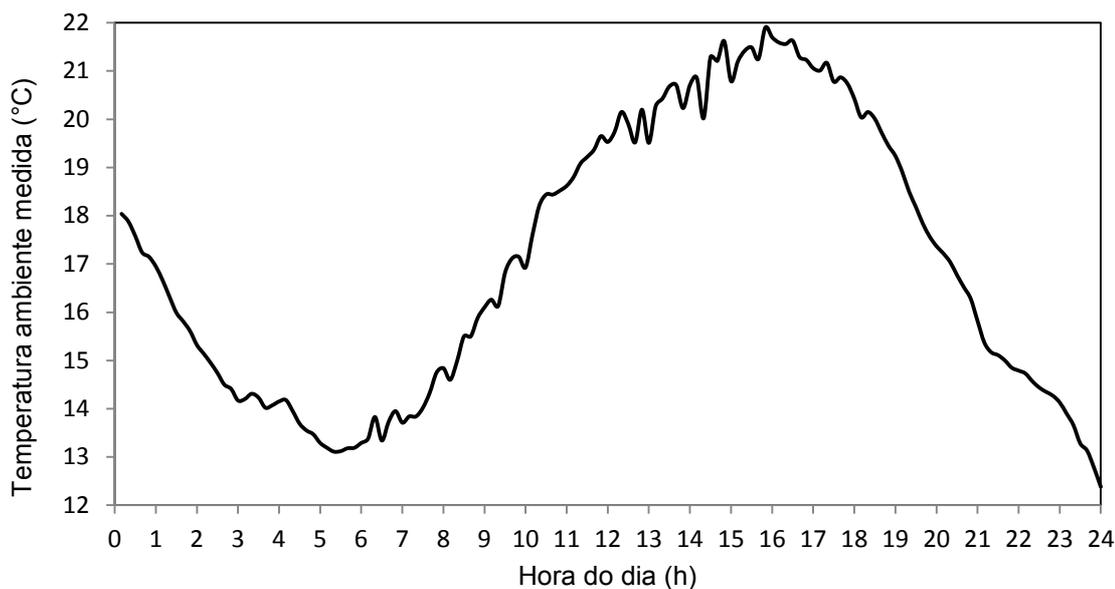


Figura 4.4: Temperatura ambiente medida em Manzanares - 08 de junho de 1987.

Fonte: Weinrebe (2010)

A Figura 4.5 ilustra o comportamento da radiação global horizontal para Manzanares, Espanha, na mesma data, com comportamento parabólico, início de incidência solar às 04h50 e término de incidência solar às 19h30. Verifica-se ainda um comportamento condizente com períodos nublados em alguns períodos do dia, o que explica a não uniformidade da parábola esperada de um dia de céu limpo.

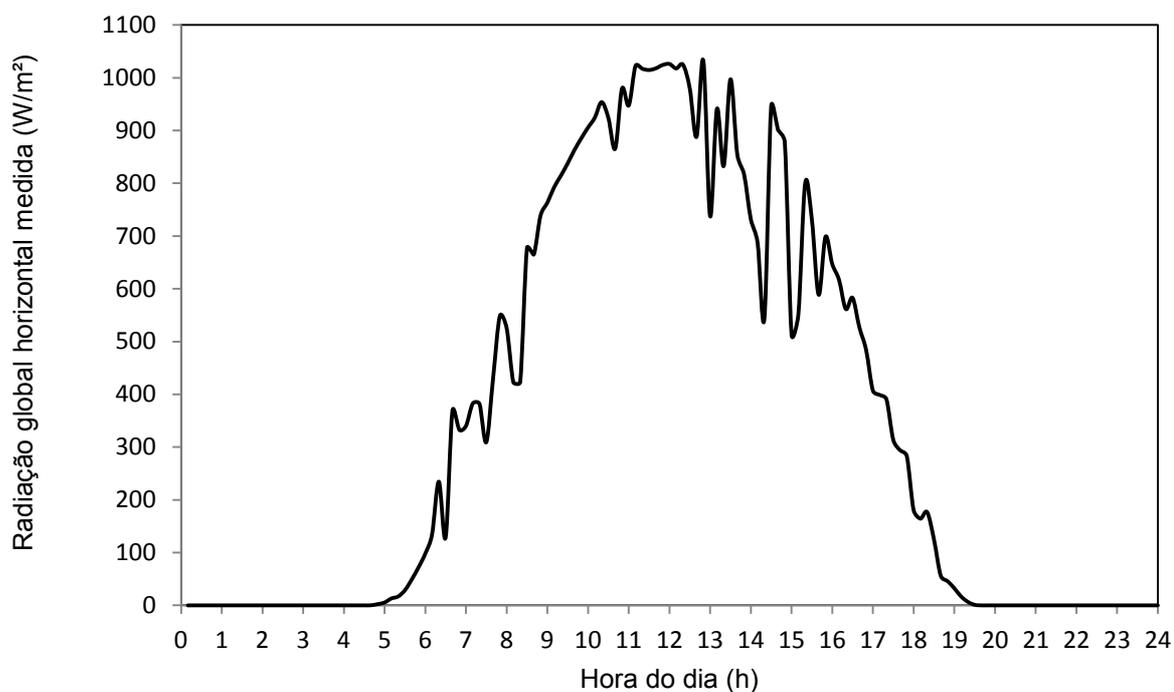


Figura 4.5: Radiação global horizontal medida em Manzanares - 08 de junho de 1987.

Fonte: Weinrebe (2010)

A Figura 4.6 mostra o comportamento da umidade relativa, necessária para obter a temperatura de orvalho e conseqüentemente a temperatura do albedo. Conforme a atmosfera vai sendo aquecida pela incidência solar, a umidade relativa vai sendo reduzida, obedecendo às leis termodinâmicas de psicrometria.



Figura 4.6: Umidade relativa do ar atmosférico medida em Manzanares - 08 de junho de 1987.

Fonte: Weinrebe (2010)

De forma a obter o coeficiente de convecção externo ao coletor, faz-se necessário conhecer a velocidade do vento atmosférico. A Figura 4.7 mostra o comportamento deste parâmetro, e é possível observar ventos com maiores magnitudes no fim de tarde.

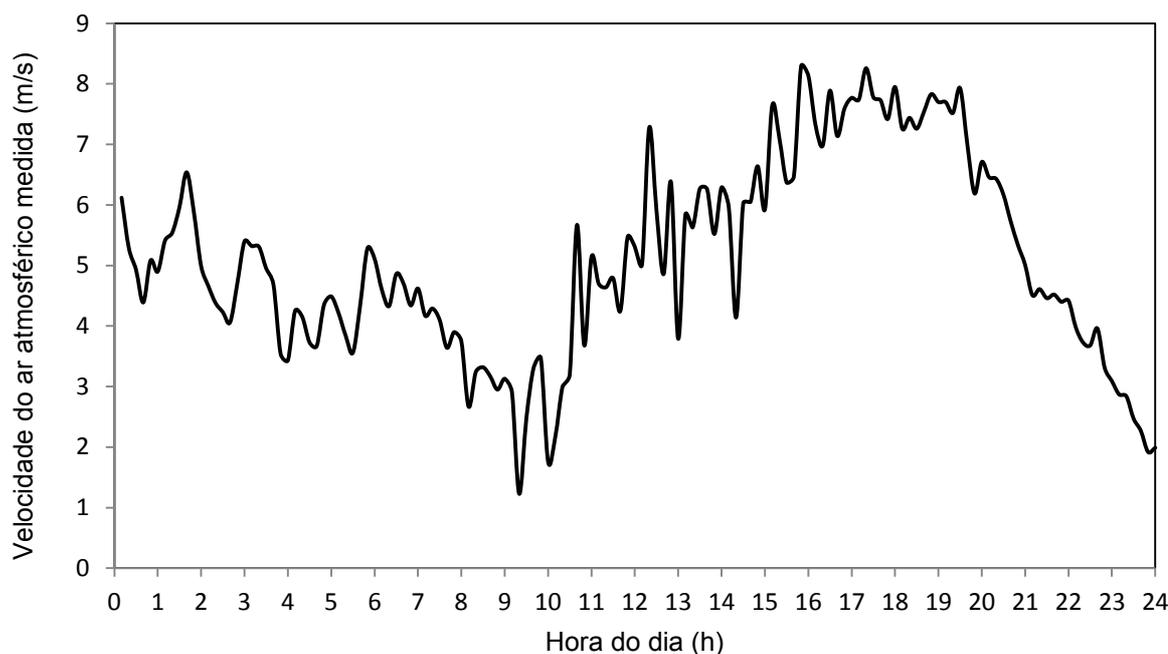


Figura 4.7: Velocidade do ar atmosférico medida em Manzanares - 08 de junho de 1987.

Fonte: Weinrebe (2010)

A eficiência da turbina é algo importante para prever a potência gerada em cada passo tempo e conseqüente energia gerada durante o dia. A Figura 4.8 mostra a eficiência da turbina para Manzanares em 08 de junho de 1987. Esta eficiência depende fortemente da velocidade do escoamento na base da chaminé, pois a turbina possui um valor ótimo de velocidade para iniciar a geração de potência, que, no caso de Manzanares, era de aproximadamente 3 m/s.

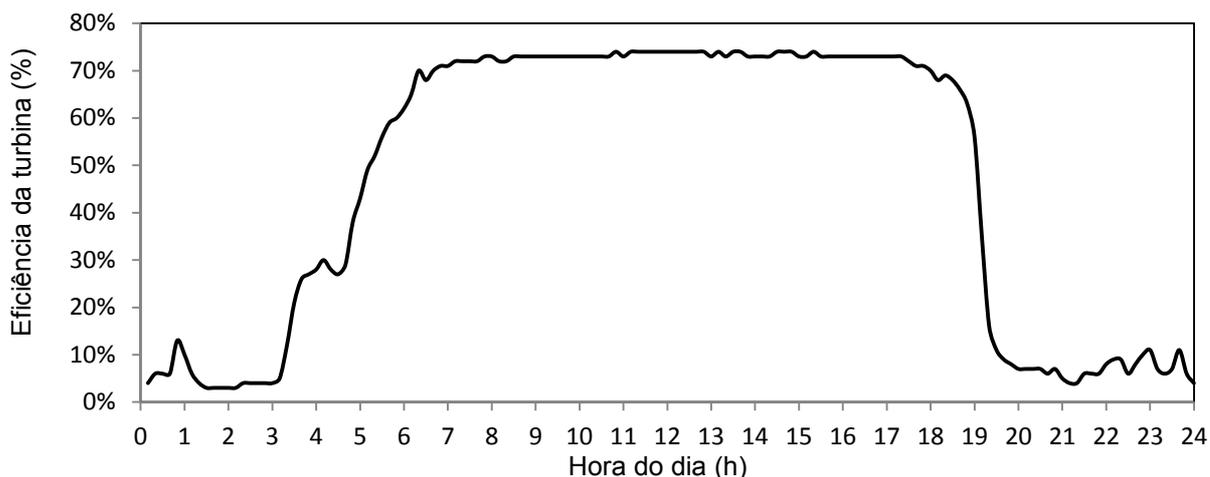


Figura 4.8: Eficiência da turbina medida em Manzanares - 08 de junho de 1987.

Fonte: Weinrebe (2010)

#### 4.5 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS

Com base nos dados coletados por Weinrebe (2010) em Manzanares, citados no item anterior, foram realizadas simulações para os quatro modelos propostos para análise, a fim de investigar o comportamento de cada um com relação aos dados experimentais e eleger o melhor modelo para utilizá-lo nas análises em território brasileiro. O perfil da potência gerada ao longo do dia para cada modelo pode ser visualizado na Figura 4.9, e uma análise detalhada é discutida a seguir. Os valores de energia gerada em um dia são mostrados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 Resultados para a potência diária gerada pelos modelos analisados.

<b>Modelo</b>	<b>Energia gerada (kWh)</b>	<b>Divergência (%)</b>
Manzanares	367,25	(Padrão)
Bernardes <i>et al.</i> (2003)	360,70	-1,60
Bernardes <i>et al.</i> (2003) modificado	372,02	1,30
Koonsrisuk <i>et al.</i> (2010)	1102,09	200,40
Koonsrisuk <i>et al.</i> (2010) modificado	504,51	37,50

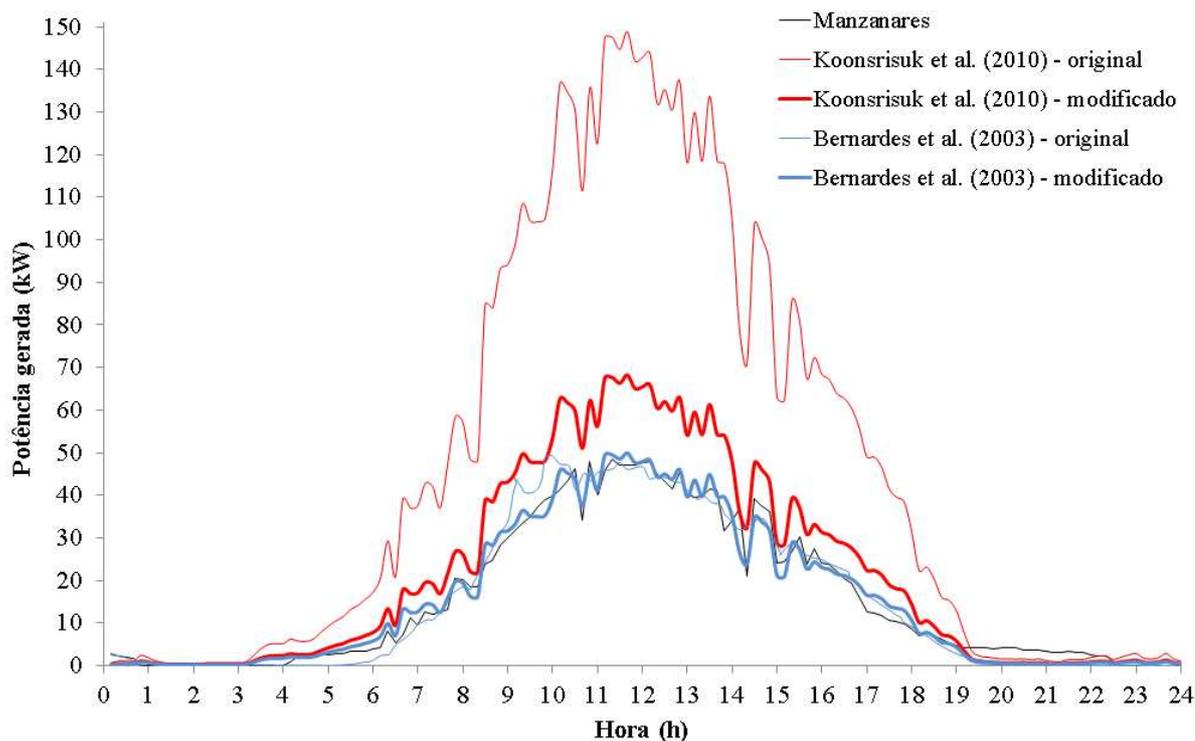


Figura 4.9: Simulação da potência gerada para cada modelo.

A energia gerada (média diária) para o modelo original de Koonsrisuk *et al.* (2010) ficou muito acima do resultado padrão fornecido por Weinrebe (2010), na ordem de 200%, conforme valor descrito na tabela 4.3. Isto se deve ao fato de várias perdas de carga ainda não serem consideradas neste modelo.

Já o modelo modificado de Koonsrisuk *et al.* (2010), proposto neste trabalho, apresenta uma diferença menor com os valores medidos de energia gerada, porém também acima do esperado, conforme listado na tabela 4.3, com uma diferença de 37,4%, provavelmente devido a outras perdas de carga de menor impacto ainda não consideradas, e de não haver trabalhos na literatura que modelem este fenômeno para esta aplicação de forma mais completa. Uma delas é a perda de carga na estrutura que suporta os vidros da cobertura, que devem gerar uma perda de carga ainda um pouco maior. Uma análise deve ser realizada para saber o arrasto em cada pilar de sustentação, e consequentemente a perda de carga localizada.

A Figura 4.10 faz um filtro na Figura 4.9, mostrando uma comparação entre os dados experimentais de Manzanares e os resultados apenas das simulações dos modelos de Koonsrisuk *et al.* (2010) e Koonsrisuk *et al.* (2010) modificado.

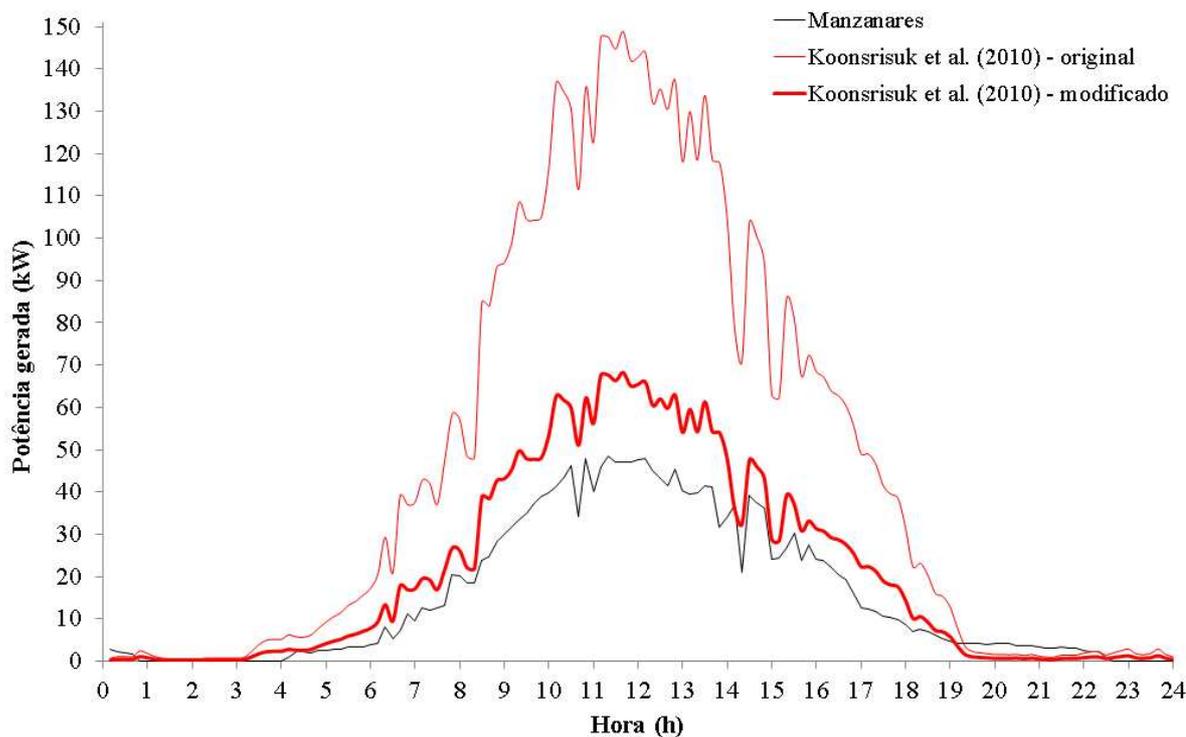


Figura 4.10: Simulação da potência gerada usando o modelo de Koonsrisuk *et al.* (2010), original e modificado.

O modelo proposto por Bernardes *et al.* (2003) obteve uma aproximação muito boa com os resultados experimentais de Manzanares, o que justifica o uso do modelo com uma boa segurança, como pode ser observado na Figura 4.9 e seu respectivo valor de energia gerada descrito na tabela 4.3, apresentando um erro de apenas -1,6%.

O modelo de Bernardes *et al.* (2003) modificado, proposto nesta tese, utilizando propriedades ópticas que consideram os efeitos das múltiplas reflexões no material vítreo e na interface vidro/solo levou a resultados ainda mais precisos para a energia gerada, como pode ser observado na tabela 4.3, observando-se um erro de 1,3%.

A Figura 4.11 faz um filtro na Figura 4.9, mostrando uma comparação entre os dados experimentais de Manzanares e os resultados apenas das simulações dos modelos de Bernardes *et al.* (2003) e Bernardes *et al.* (2003) modificado.

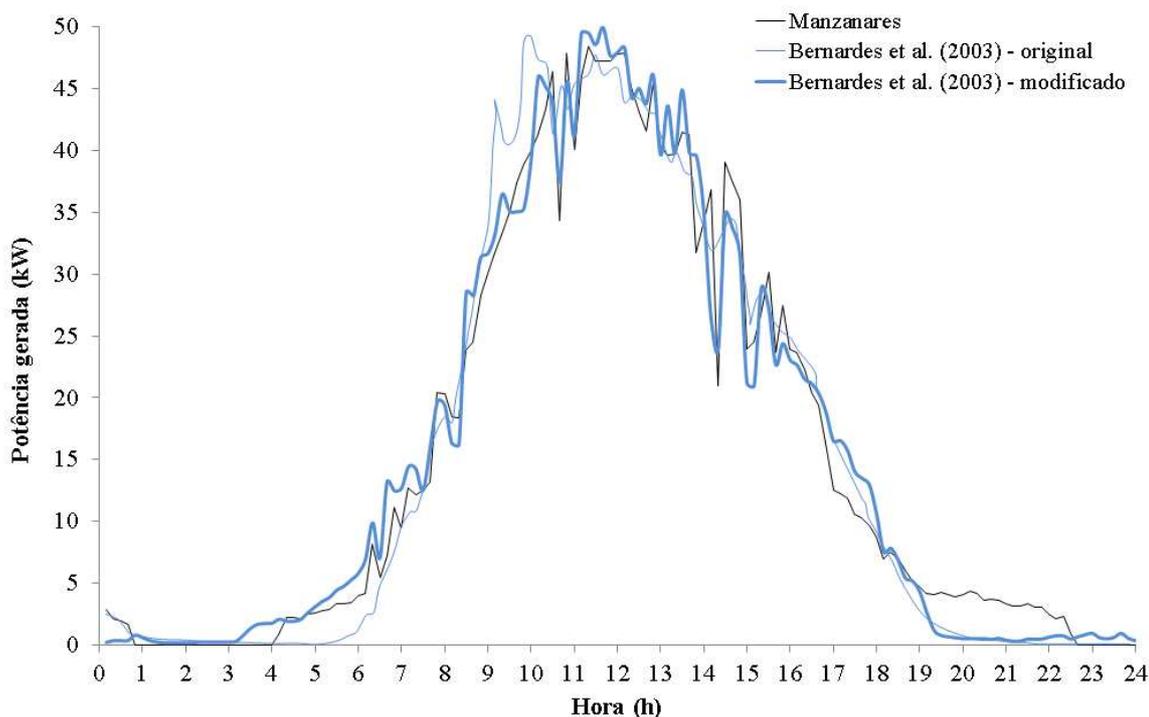


Figura 4.11: Simulação da potência gerada usando o modelo de Bernardes *et al.* (2010), original e modificado.

Tendo em vista a discrepância obtida com os dois modelos de Koonsrisuk *et al.* (2010), e levando em conta que o fator de atrito, assim como todas as demais perdas de carga utilizadas são empíricas ou muito mais difíceis de serem obtidas numericamente, os modelos de Koonsrisuk *et al.* (2010) são modelos interessantes, mas que merecem um estudo mais aprofundado de todas as variáveis envolvidas, ainda não abordadas de forma completa pela literatura. Já os modelos de Bernardes *et al.* (2003) fornecem resultados muito mais confiáveis para estimar a geração de potência, com uma divergência em relação aos dados experimentais de Weinrebe (2010) na ordem de -1,6% e 1,3%, respectivamente.

Quanto a comparação entre o método proposto originalmente por Bernardes *et al.* (2003) e a alteração proposta neste trabalho, que considera o fenômeno das múltiplas reflexões no material vítreo e entre este e o solo, é possível afirmar que uma parcela maior de calor fica retida pelo coletor vítreo e uma fração maior de energia é absorvida pela corrente de ar, proporcionando uma potência gerada um pouco maior do que a obtida originalmente por Bernardes *et al.* (2003). Nota-se que um erro muito pequeno foi obtido, o que é favorável ao uso do modelo proposto.

Quanto aos outros parâmetros importantes para serem avaliados, destacam-se o acréscimo de temperatura provido pelo coletor e a velocidade máxima que a corrente de ar

desenvolve na chaminé. Nas Figuras 4.12 e 4.13 compara-se o experimento de Manzanares (Weinrebe, 2010), com o modelo de Bernardes *et al.* (2003) modificado neste trabalho. Utiliza-se nesta comparação somente o modelo de Bernardes *et al.* (2003) por ter sido o modelo que apresenta maior concordância com os valores experimentais, conforme resultados anteriores.

As curvas de acréscimo de temperatura podem ser visualizadas na Figura 4.12, e apresentam o diferencial de temperatura entre a entrada do coletor (ar atmosférico) e a temperatura máxima atingida na saída do coletor, ou seja, na base da chaminé.

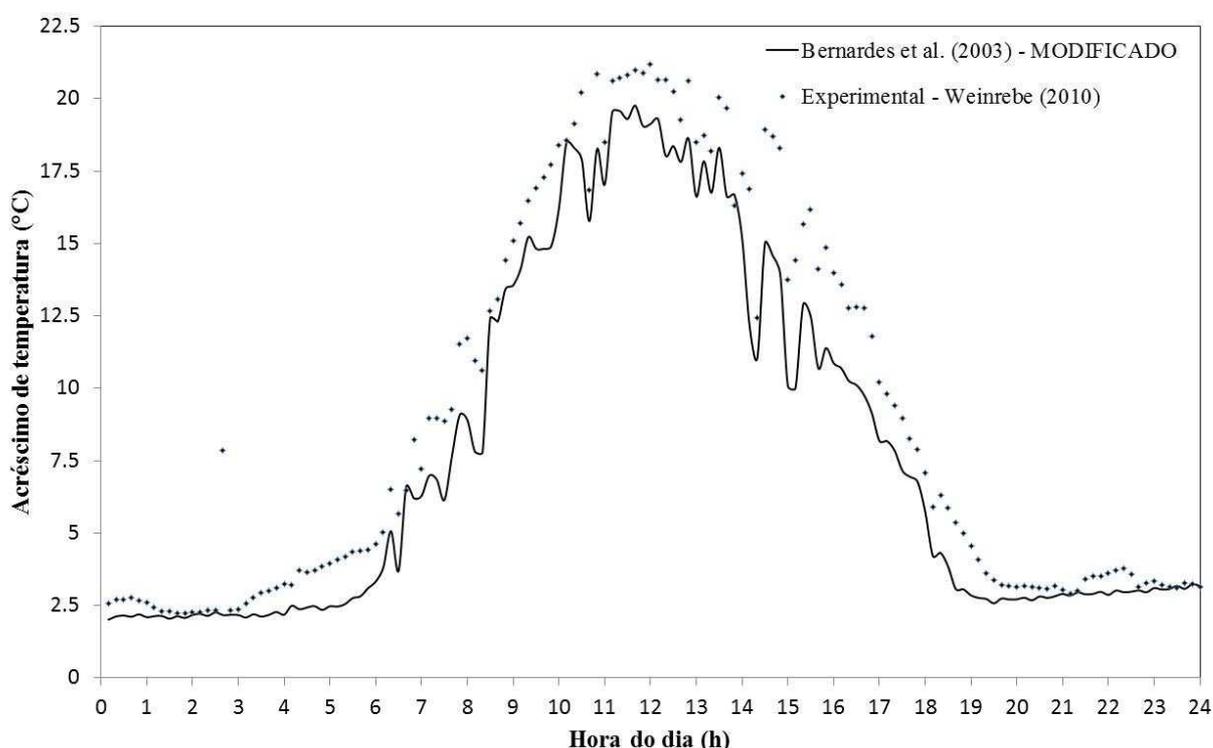


Figura 4.12: Perfis de acréscimo de temperatura obtida para cada modelo.

As curvas de velocidade máxima na chaminé são apresentadas na Figura 4.13. Esta velocidade máxima ocorre na base da chaminé, pois é a região onde a massa específica do ar é a menor de todo o sistema e onde a área é menor. Quando o fluxo de ar se dirige para a saída da chaminé, a velocidade tende a diminuir, pois a massa específica do ar tende a aumentar devido ao resfriamento do ar em seu interior.

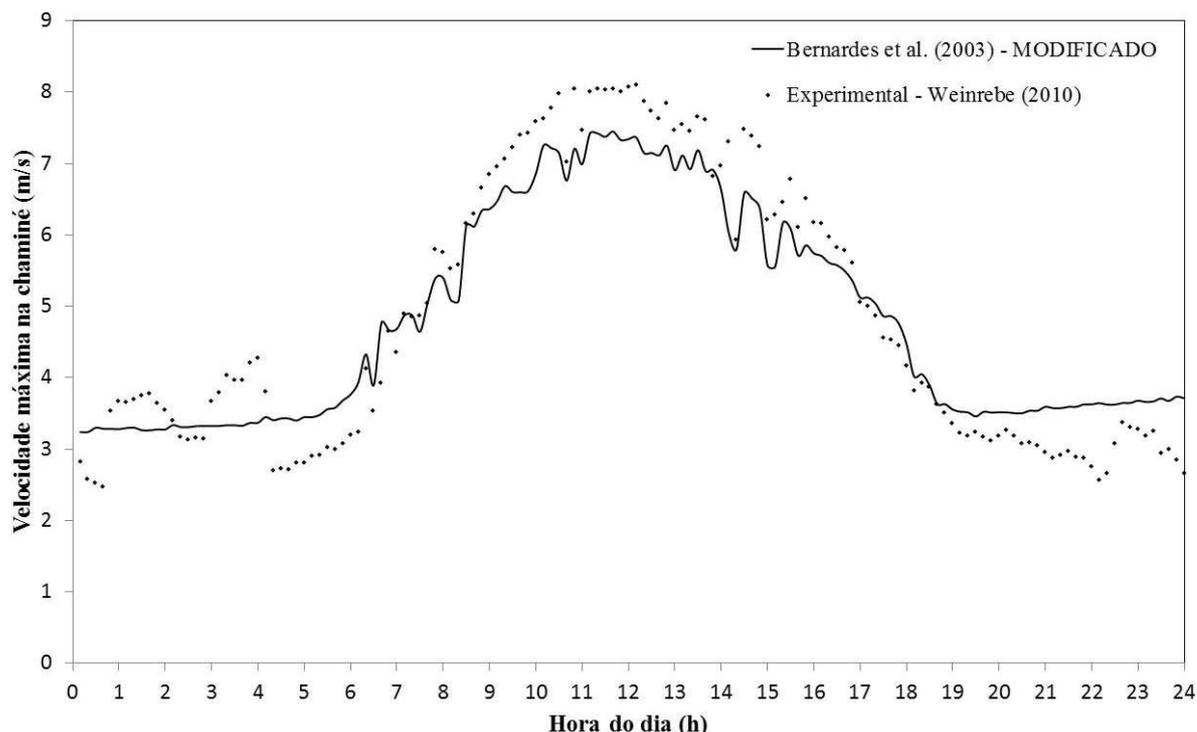


Figura 4.13: Perfis de velocidade máxima na chaminé obtida para cada modelo.

Vale ressaltar que não há informações sobre as incertezas de medições realizadas em Manzanares em 1987. Portanto, considera-se a hipótese de que os resultados medidos pela equipe de Manzanares estejam corretos, e consideram-se estes resultados como padrão.

#### 4.6 CONCLUSÕES PARCIAIS

O código computacional foi elaborado e desenvolvido em C++, sendo realizada a simulação dos 4 modelos propostos, entre eles o modelo de Bernardes *et al.* (2003), o de Koonsrisuk *et al.* (2010), Bernardes *et al.* (2003) modificado com a inclusão dos efeitos das múltiplas reflexões no material vítreo e múltiplas reflexões entre o coletor e o solo, e o modelo de Koonsrisuk *et al.* (2010) modificado com a inclusão destes efeitos de múltiplas reflexões e ainda com o acréscimo de um maior número de perdas de carga localizadas estudadas por Von Backström *et al.* (2006), visto o modelo original de Koonsrisuk *et al.* (2010) considerar apenas o efeito da perda de carga abaixo do coletor, devido a aceleração do fluido no coletor e ainda na chaminé. Estes quatro modelos, os dois originais de Bernardes *et al.* (2003) e de Koonsrisuk *et al.* (2010) e os dois modelos modificados pela proposta deste trabalho foram validados com base nos dados de Manzanares, fornecidos por Weinrebe (2010) – Anexo II.

O modelo de Bernardes *et al.* (2003) modificado com a inclusão dos efeitos de múltiplas reflexões apresentou a melhor concordância com os resultados experimentais fornecidos por Weinrebe (2010) referentes a planta piloto de Manzanares, obtendo-se uma diferença de apenas 1,3%.

Devido a este excelente ajuste com relação aos dados experimentais, este é o modelo utilizado nas análises energéticas para o Brasil.

## 5 RESULTADOS

Antes de iniciar as simulações para o território brasileiro, faz-se necessário estipular as dimensões da planta proposta e os dados sobre o material da cobertura e do solo.

A altura da planta é definida em 500 metros. Muitos autores na literatura realizam simulações envolvendo torres muito elevadas, na ordem de 1000~1500 metros. Porém, as empresas que estão neste ramo estão reduzindo a altura de suas chaminés para o patamar de 250~500 metros, por motivos de tecnologia de construção. Torres muito elevadas são um risco do ponto de vista da engenharia, pois a construção se torna cara e perigosa, podendo colocar em risco o investimento. Os resultados mostrados por este estudo consideram ainda um diâmetro do coletor (superfície vítrea) de 1000 m e, uma variável que será mantida constante, é o diâmetro da chaminé, que é mantido a 5% do diâmetro do coletor, como em Manzanares e em diversos outros estudos na literatura.

O estudo conduzido neste trabalho mostra simulações para uma gama variada de alturas e diâmetros de coletores, para mostrar a influência destes parâmetros na geração de potência. Para outras configurações, uma superfície de resposta (regressão bidimensional) é realizada para se obter uma relação entre o diâmetro e a altura na potência gerada, podendo retornar valores para quaisquer configurações.

Quanto à qualidade do material vítreo, é utilizado um material vítreo de classificação NFRC ID 5003 com 4,673 mm de espessura e coeficiente de extinção 19,7. Uma análise de sensibilidade sobre este parâmetro é mostrado posteriormente.

Uma vez definidos e validados os modelos físicos, matemáticos e numéricos empregados, faz-se necessário definir os dados de entrada comuns a quaisquer modelos que venham a ser estudados.

### 5.1 INCIDÊNCIA DE RADIAÇÃO SOLAR EM TERRITÓRIO BRASILEIRO

A incidência de radiação solar não só é importante para o início de qualquer simulação, mas também para se definir a melhor localização geográfica para a implantação de uma usina deste tipo. Assim, é necessário saber o potencial de energia solar que incide sobre a região de estudo, neste caso, o Brasil, e suas regiões limítrofes. Para tanto, existem diversos arquivos climáticos disponíveis na literatura. Uma opção confiável são os arquivos climáticos do

LabEEE/UFSC (Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina), porém só se encontram arquivos de algumas capitais, não sendo suficiente para uma análise mais detalhada da incidência de radiação global em território brasileiro. Desta forma, o uso de um atlas solarimétrico que forneça dados de um número maior de cidades, estados e regiões proporciona maior precisão na pesquisa da melhor região brasileira.

O atlas solarimétrico utilizado foi elaborado pelo Grupo de Pesquisa em Fontes Alternativas de Energia (2003). O atlas mostra mapas de isolinhas para cada mês do ano e um mapa de isolinhas com a média anual do país. Os valores utilizados para a confecção destes mapas de isolinhas são extraídos de bancos de dados internos que são alimentados por inúmeras estações actinográficas e piranométricas espalhadas pelo país. Estas estações são equipadas por actinógrafos<sup>5</sup> e piranômetros<sup>6</sup> que medem a radiação solar total, direta e difusa.

Porém, um mapa de isolinhas representa a radiação solar global diária, média anual, mostrando apenas regiões onde a radiação se encontra em determinado intervalo. A Figura 5.1 mostra o gráfico de isolinhas para o Brasil, já com valores médios diários para todo o ano.

Mais importante do que esta versão gráfica destes mapas de isolinhas, é o banco de dados que este atlas possui. Através deste foi possível extrair os dados para gerar tabelas para uma análise mais precisa das incidências de radiação na superfície do território brasileiro.

---

<sup>5</sup> Instrumento usado para medir a radiação global. Este instrumento é composto de sensores baseados na expansão diferencial de um par bimetálico. Os sensores são conectados a uma pena que, quando de suas expansão, registram o valor instantâneo da radiação solar (Grupo de Pesquisa em Fontes Alternativas de Energia, 2003).

<sup>6</sup> Os piranômetros medem a radiação global. Este instrumento caracteriza-se pelo uso de uma termopilha que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, uma pintada de preto e outra pintada de branco igualmente iluminadas. A expansão sofrida pelas superfícies provoca um diferencial de potencial que, ao ser medida, mostra o valor instantâneo da energia solar (Grupo de Pesquisa em Fontes Alternativas de Energia, 2003).



Figura 5.1: Mapa de isolinhas para a radiação solar global diária, média anual em  $\text{MJ}/\text{m}^2$

Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil (2003)

Porém, um mapa de isolinhas não fornece uma precisão dos verdadeiros valores de cada uma, sendo necessário, para a simulação, dos reais valores de radiação solar global diária para cada cidade analisada. No anexo I deste documento, as tabelas C.1 e C.2 mostram dados de 533 estações de diferentes cidades, sendo 471 estações de cidades brasileiras e 62 de estações localizadas em países vizinhos ao Brasil, necessárias para modelar a fronteira do país. Desta vasta gama de informações, é possível traçar um panorama de valores para cada estado e região, possibilitando escolher o melhor local para instalação da chaminé solar e obter o parâmetro de radiação a ser utilizado nas análises numéricas.

Com os dados de entrada definidos, faz-se necessário saber qual o número de seções (elementos) adequado para dividir o coletor para a realização das simulações, visto que um número muito pequeno de elementos pode gerar uma margem de erro muito grande e muitos elementos podem afetar consideravelmente o tempo de processamento das simulações.

## 5.2 ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DO MODELO

Para se determinar um valor coerente do número de seções utilizadas para a simulação, uma análise de convergência foi realizada para se determinar a partir de qual número de seções ocorre uma estabilidade nos resultados. Para tanto, o método proposto – Bernardes *et al.* (2003) modificado – foi simulado considerando variações no número de elementos, de 100 a 5.000 elementos radiais. Foi adotado a quantidade de 5.000 elementos para garantia de convergência, e o resultado pode ser melhor visualizado na Figura 5.2 e na tabela 5.1.

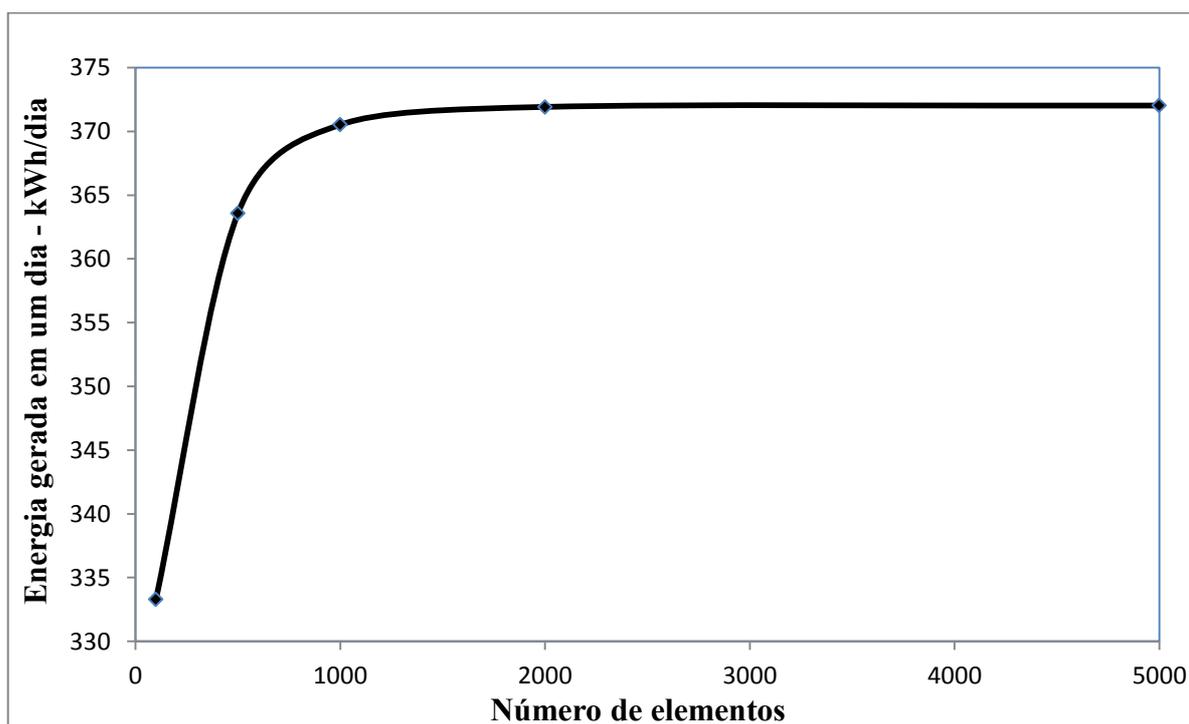


Figura 5.2: Análise de convergência – Influência do número de elementos na simulação.

Nota-se, analisando o gráfico ilustrado pela Figura 5.2 e pelos valores indicados na tabela 5.1, que há uma grande variação nos valores obtidos até a marca de 1000 elementos. Apesar de pequena a margem de erro apresentada pela utilização de 1000 elementos, optou-se por utilizar 2000 elementos, visto a diferença apresentada entre o uso de 2000 elementos e de 5000 elementos ser de apenas 0,03%.

Tabela 5.1 Influência do número de elementos na simulação

Número de elementos	100	500	1000	2000	5000
Potência gerada (kWh/dia)	333,3	363,6	370,5	371,9	372,0
Diferença: n° elementos e n° de elem. anteriores	-	8,3%	1,9%	0,4%	0,03%
Tempo aproximado de processamento (min)*	0,8	1	2	3	10

\* 2ª geração do Processador Intel® Core I5, 6GB de memória RAM.

### 5.3 ANÁLISES NO TERRITÓRIO BRASILEIRO PARA O INVERNO

Os resultados e discussões apresentados são divididos em categorias, tais como gráficos de isolinhas e análise de sensibilidade para energia gerada, pico de potência e energia gerada pelos módulos fotovoltaicos.

#### 5.3.1 Análise da energia gerada

Com base na geometria proposta, é obtida a seguinte distribuição do potencial energético de chaminés solares no inverno em todo o território brasileiro, mostrada pela Figura 5.3. Os valores obtidos são mostrados na tabela 5.2, para as principais localidades do Brasil. A energia gerada é expressa em MWh/dia.

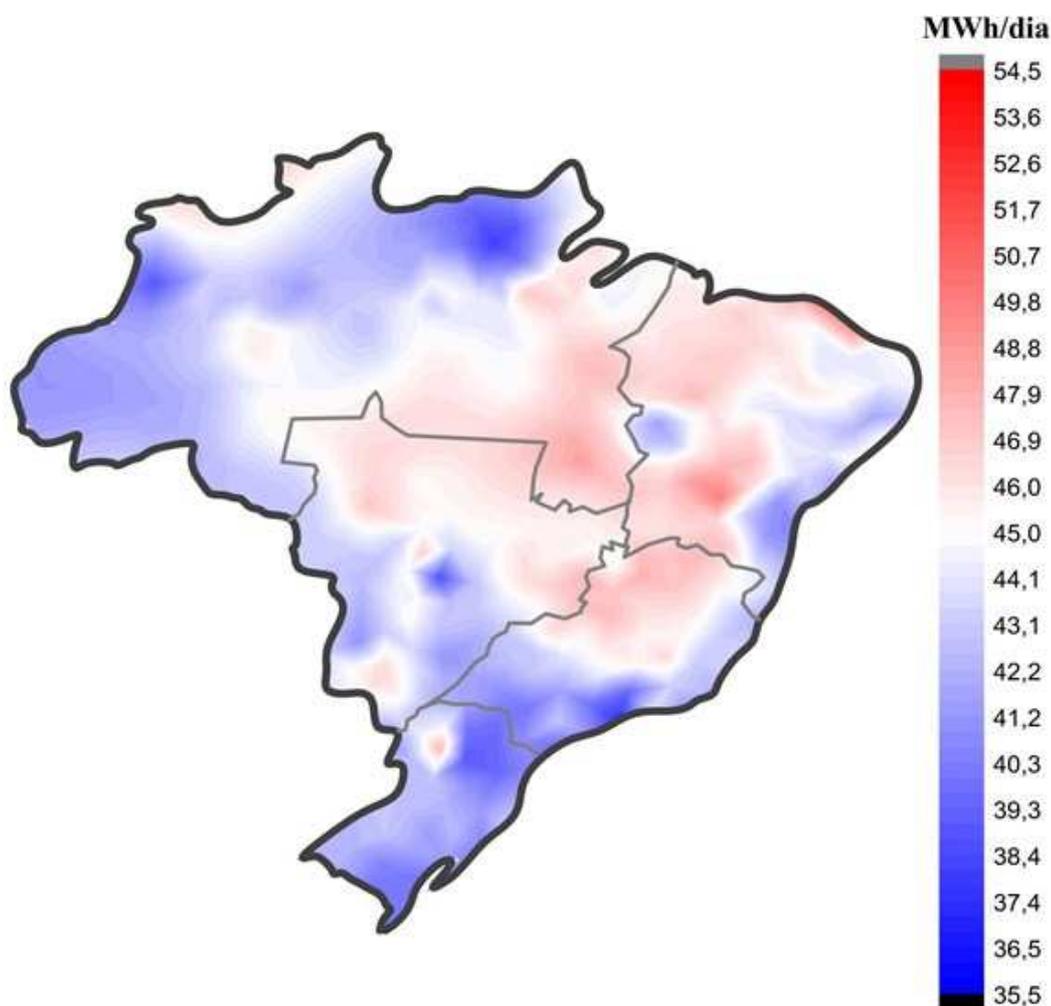


Figura 5.3: Distribuição do potencial de energia diária gerada - inverno

Verifica-se um maior potencial energético no nordeste, mais especificamente em Sergipe, no município de Propriá, com uma média de 51,4 MW.h/dia para o inverno. A região sul possui baixo potencial energético no inverno, assim como as regiões sombreadas da região amazônica.

### 5.3.2 Análise do pico de potência gerado

Com base na geometria proposta, é obtida a seguinte distribuição do potencial de pico de potência de chaminés solares no inverno em todo o território brasileiro, mostrada na Figura 5.4. Os valores obtidos são apresentados na tabela 5.2, para as principais localidades do Brasil. O pico de potência gerado é expresso em MW, média diária.

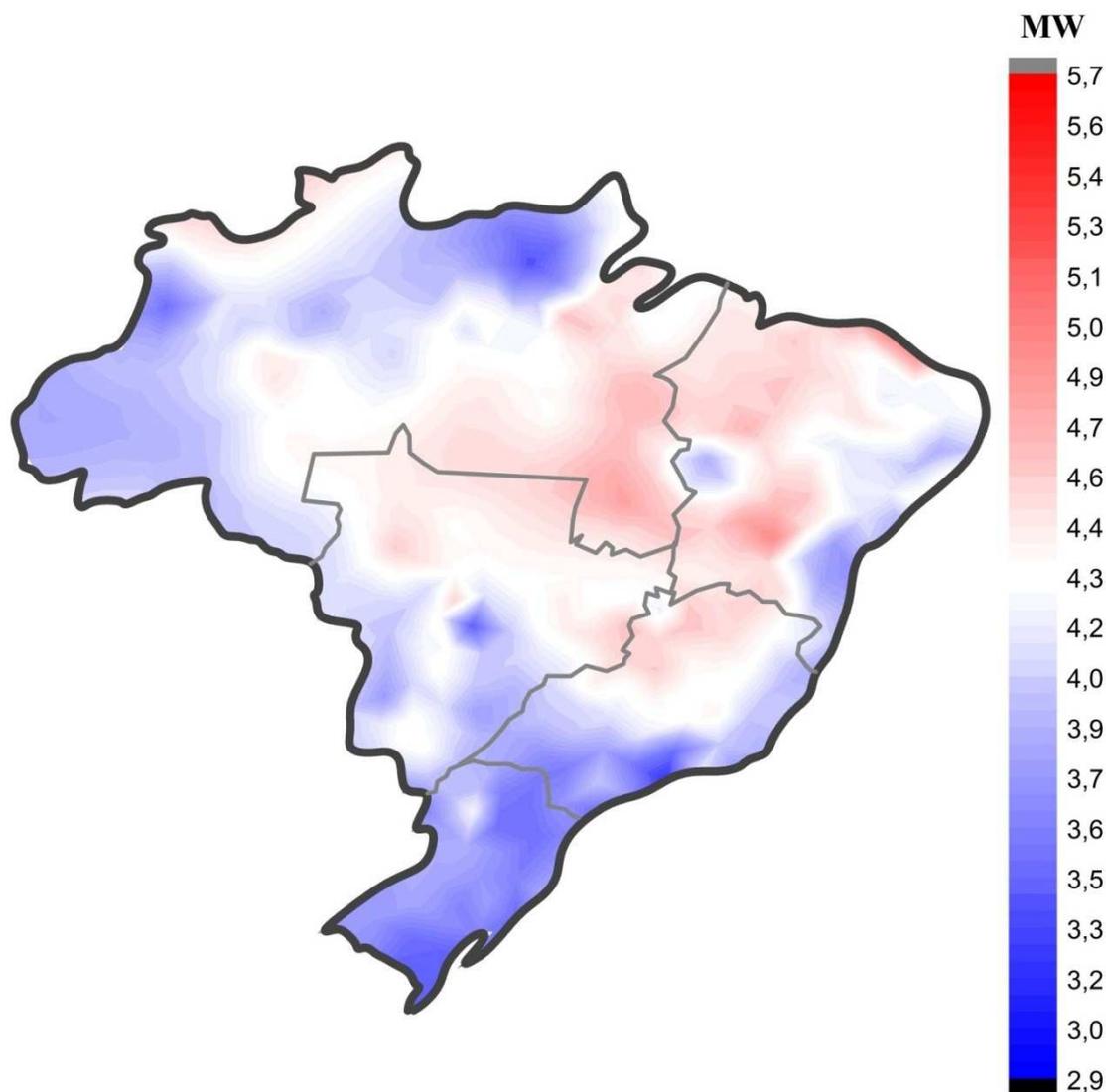


Figura 5.4: Distribuição do potencial de pico de potência diária - inverno

Verifica-se um maior pico de potência no nordeste, mais especificamente em Sergipe, no município de Propriá, com uma média de 5,21 MW para o inverno. A região sul possui baixo potencial energético no inverno, assim como as regiões sombreadas da região amazônica.

### 5.3.3 Análise da energia fotovoltaica gerada

Com base na geometria proposta, e incluindo as células fotovoltaicas na periferia onde a temperatura é menor e conseqüentemente sua eficiência maior (a influência da localização na eficiência e discutida doravante), é obtida a seguinte distribuição do potencial energético apenas dos módulos fotovoltaicos, no inverno, em todo o território brasileiro, mostrada pela Figura 5.5. Como é incerto o valor da área a ser coberta, por depender do investidor, os resultados são expressos por unidade de área. Os valores obtidos são mostrados na tabela 5.2, para as principais localidades do Brasil. A energia gerada por unidade de área dos módulos fotovoltaicos é expressa em  $\text{Wh/m}^2\text{dia}$ .

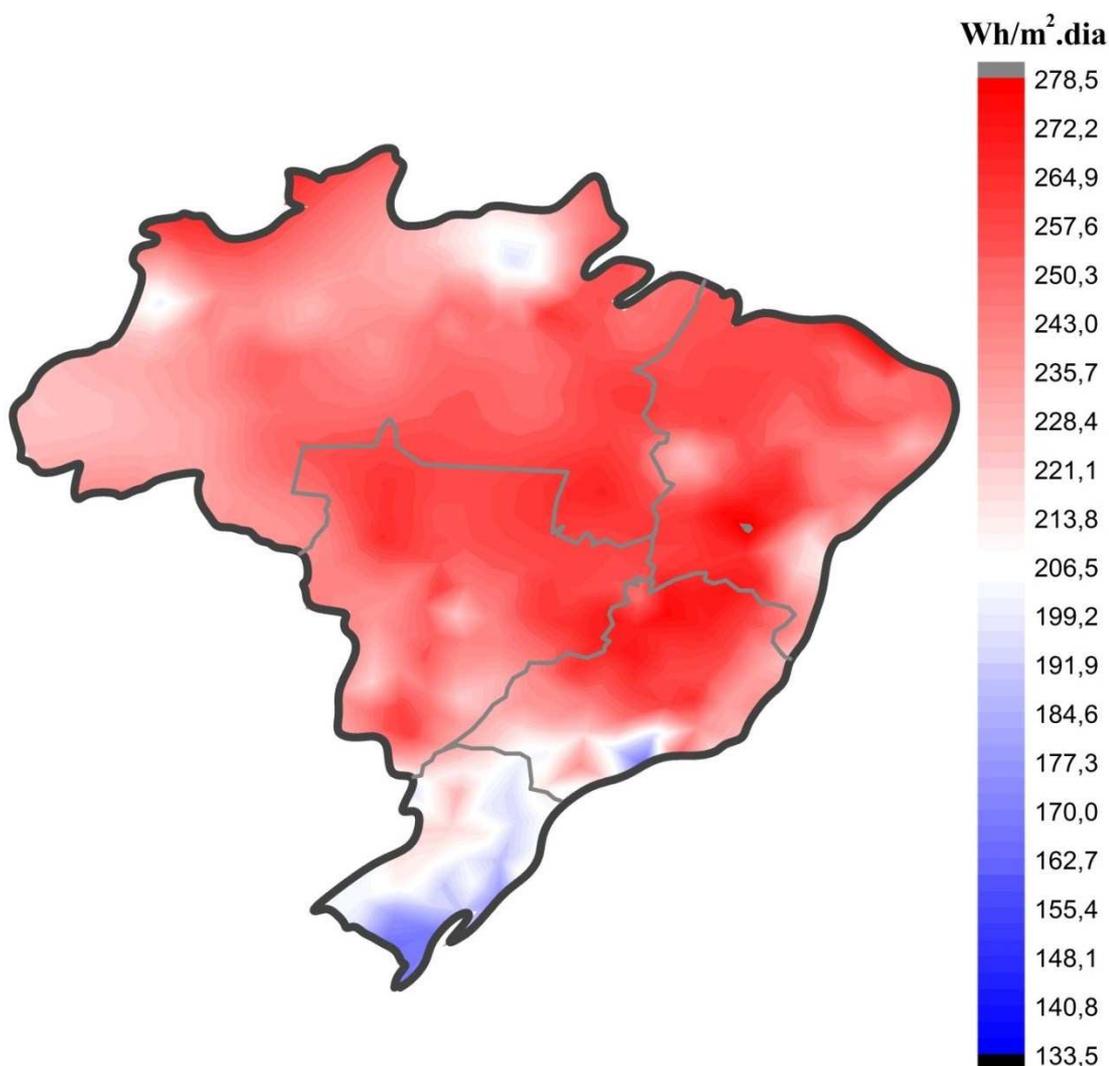


Figura 5.5: Distribuição do potencial de energia fotovoltaica diária por un. de área - inverno

Verifica-se que a geração por módulos fotovoltaicos depende fortemente da radiação solar incidente, mas não é proporcional apenas a esta incidência de radiação, pois a temperatura dos módulos afeta a sua eficiência.

## 5.3.4 Resumo dos resultados para o inverno

A tabela 5.2 mostra os principais resultados obtidos para as capitais e cidades com maior incidência de radiação solar em cada estado brasileiro, durante o período de inverno.

Tabela 5.2 Resumo dos valores obtidos nas análises para o inverno

Região	UF	Cidade	Radiação solar (MJ/m <sup>2</sup> )	Pico de potência (MW)	Energia diária gerada Planta (MWh)	Energia fotovoltaica gerada (Wh/m <sup>2</sup> )
Norte	AP	Macapá	16,40	4,27	44,49	248,34
	AP	Oiapoque	15,60	4,16	43,65	242,96
	AM	Coari	18,40	4,51	46,09	254,28
	AM	Manaus	17,00	4,31	44,64	247,56
	PA	Belém	18,20	4,49	45,99	254,40
	PA	Marabá	19,30	4,65	47,13	258,65
	RO	Porto Velho	17,20	4,38	45,22	252,24
	RO	Vilhena	16,00	4,20	43,96	245,43
	RR	Boa Vista	14,40	3,97	42,19	231,65
	<b>TO</b>	<b>Palmas</b>	<b>20,20</b>	<b>4,84</b>	<b>48,69</b>	<b>267,50</b>
TO	Tocantinópolis	18,70	4,62	47,09	262,21	
Nordeste	AL	Pão De Açúcar	14,20	3,99	42,48	234,29
	AL	Maceió	14,10	3,97	42,38	233,38
	BH	Salvador	15,00	4,17	44,03	246,92
	BH	Santa Rita De Cássia	19,20	4,79	48,56	272,88
	CE	Acarauá	18,60	4,62	47,14	263,13
	CE	Fortaleza	18,20	4,56	46,71	261,32
	MA	Caxias	19,00	4,63	47,10	260,94
	MA	São Luiz	18,00	4,49	46,05	256,14
	PB	Cajazeiras	18,70	4,67	47,59	266,77
	PB	João Pessoa	15,40	4,19	44,07	246,91
	PE	Fernando de Noronha	17,40	4,50	46,38	261,61
	PE	Recife	13,70	3,96	42,45	233,20
	PI	Teresina	19,00	4,61	46,88	258,21
	PI	Uruçuí	19,70	4,71	47,61	261,11
	RN	Cruzeta	17,10	4,38	45,29	253,26
	RN	Natal	16,30	4,26	44,45	248,68
	SE	Aracajú	15,10	4,11	43,39	241,56
	<b>SE</b>	<b>Propriá</b>	<b>22,60</b>	<b>5,21</b>	<b>51,40</b>	<b>272,24</b>
Centro Oeste	DF	Brasília	13,20	4,07	43,78	240,39
	GO	Goiania	18,40	4,77	48,68	277,62
	GO	Goiás	15,60	4,35	45,59	258,40
	MG	<b>Cuiabá</b>	<b>20,90</b>	<b>5,01</b>	<b>50,08</b>	<b>275,61</b>
	MG	Utiariti	18,20	4,61	47,15	266,11
	MS	Campo Grande	12,00	3,73	40,82	217,20
	MS	Corumbá	15,60	4,25	44,61	251,58

Sudeste	ES	Conceição Da Barra	13,00	3,85	41,61	226,10
	ES	Vitória	13,40	3,91	42,02	230,24
	MG	Belo Horizonte	14,90	4,31	45,61	258,05
	<b>MG</b>	<b>Januária</b>	<b>16,60</b>	<b>4,57</b>	<b>47,51</b>	<b>272,62</b>
	RJ	Cabo Frio	13,80	4,08	43,61	242,43
	RJ	Rio De Janeiro	11,60	3,76	41,26	217,77
	SP	Pradópolis	15,40	4,32	45,39	257,33
	SP	São Paulo	10,80	3,64	40,45	207,72
Sul	PR	Curitiba	10,20	3,54	39,65	198,97
	PR	Londrina	12,40	3,86	41,97	226,55
	RS	Ijuí	11,60	4,08	44,73	235,06
	RS	Porto Alegre	8,50	3,60	41,19	186,80
	<b>SC</b>	<b>Araranguá</b>	<b>12,80</b>	<b>4,16</b>	<b>44,96</b>	<b>245,64</b>
	SC	Florianópolis	9,90	3,72	41,70	205,54

Tendo em vista que o potencial energético de chaminés solares é dependente de suas características geométricas, optou-se por utilizar um gráfico tridimensional que relaciona a energia gerada pela chaminé solar, pico de potência e energia gerada por módulos fotovoltaicos com o diâmetro do coletor e altura da chaminé. Este gráfico tridimensional fornece subsídios para o uso de uma superfície de resposta, que retorna uma equação com a tendência destes parâmetros de saída em função do diâmetro do coletor e altura da chaminé. Estas análises são mostradas a seguir, para o período do inverno.

### 5.3.5 Influência dos parâmetros geométricos – Energia gerada

Dados da cidade de Propriá, Sergipe, que, conforme a Tabela 5.2, obteve maior energia gerada no inverno, foram utilizados para obter uma superfície que representa o comportamento dos parâmetros geométricos na energia diária gerada. Para confeccionar tal superfície, foram realizadas 56 simulações, com diâmetro do coletor variando de 200 a 500 metros, com incremento de 50 metros entre simulações, e alturas da chaminé variando de 100 a 800 metros, com incrementos de 100 metros. A superfície encontrada pode ser visualizada na Figura 5.6.

Percebe-se, ao analisar este gráfico tridimensional, que, para pequenas alturas de chaminé, a variação do diâmetro do coletor não implica em aumento significativo na geração de potência. Mesmo utilizando um coletor com grande diâmetro, a energia gerada não aumenta significativamente. De forma semelhante, ao manter um diâmetro pequeno de coletor, o aumento da altura da chaminé já implica em um aumento de energia gerada, mas ainda de forma não muito significativa. O aumento passa a ser muito significativo quanto maior a

altura da chaminé e quanto maior o diâmetro do coletor, não havendo um ponto ótimo para a geração de energia (quanto maiores forem estes parâmetros, maior a geração de energia). Para a obtenção desta superfície foi utilizado o software OriginPro<sup>®</sup>, que também possui ferramentas de regressão bidimensional, conhecida como superfície de resposta.

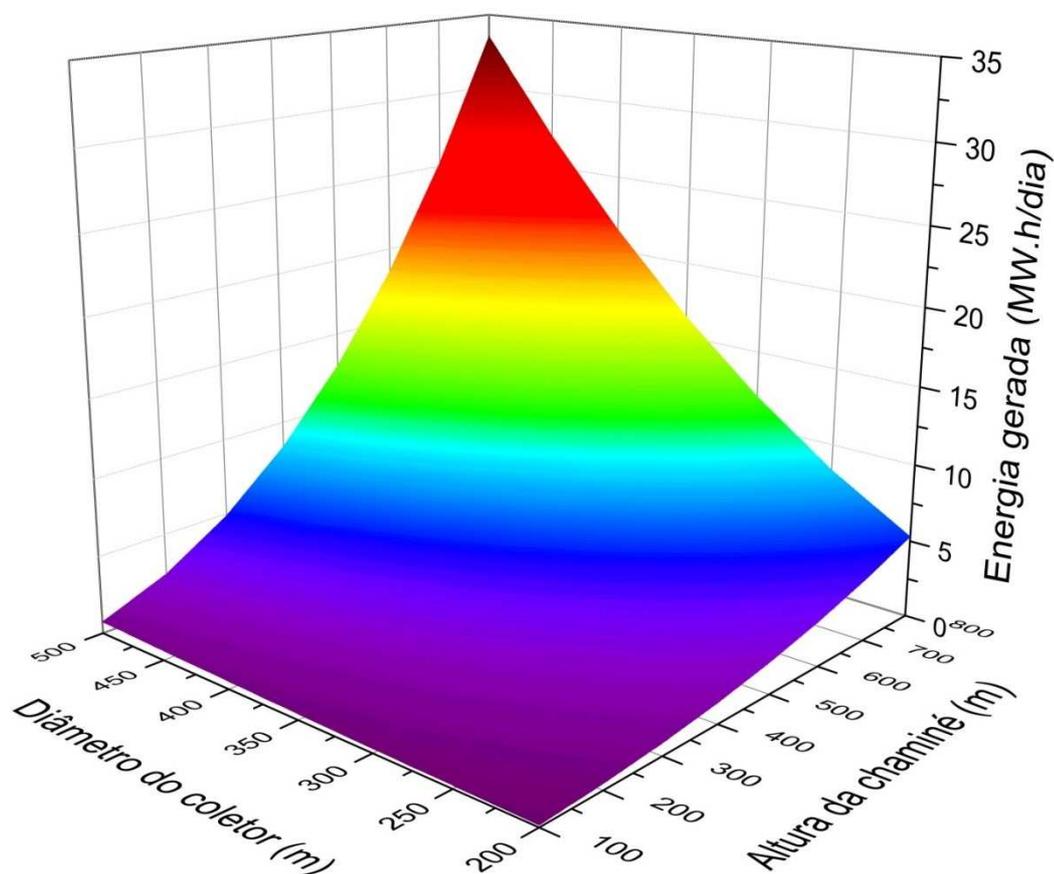


Figura 5.6: Influência da geometria da planta na energia diária gerada (inverno)

Com base nos dados da região de Propriá-SE, que obteve o melhor potencial energético para o período de inverno, foi realizada uma análise de regressão bidimensional para o ajuste da superfície de resposta. Para tanto, foram testadas várias equações bidimensionais já embutidas no software, e a que retornou um resultado mais confiável foi a seguinte expressão, dada pela equação (5.1):

$$E = z_0 + a \cdot H_{ch} + b \cdot D_c + c \cdot H_{ch}^2 + d \cdot D_c^2 + f \cdot D_c \cdot H_{ch} \quad \left[ \frac{MW \cdot h}{dia} \right] \quad (5.1)$$

O ajuste desta superfície por esta equação retorna um coeficiente de determinação  $R^2=0,9875$ , ou seja, 98,75% dos pontos da superfície se ajustam a equação proposta para esta cidade. Dos 1,25% pontos restantes que não se ajustam, um  $\chi^2$  de 0,72, que é a soma do

quadrado das distâncias dos pontos não ajustados à superfície ajustada, é considerado pequeno perto do ajuste de outras equações. A tabela A.1 no apêndice A deste trabalho mostra os valores  $z_0$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e  $f$  para as demais cidades já citadas pela tabela 5.2.

### 5.3.6 Influência dos parâmetros geométricos – Pico de potência

Quanto ao pico de potência gerada no território brasileiro, no inverno, também se destaca a cidade de Propriá-SE, o que é esperado, visto a energia gerada ser dependente da soma das potências geradas ao longo do dia. A Figura 5.7 mostra a influência da geometria no pico de potência. Verifica-se também que a altura da chaminé influencia mais significativamente este pico do que o diâmetro do coletor, que passa a contribuir mais quanto maior a altura da chaminé.

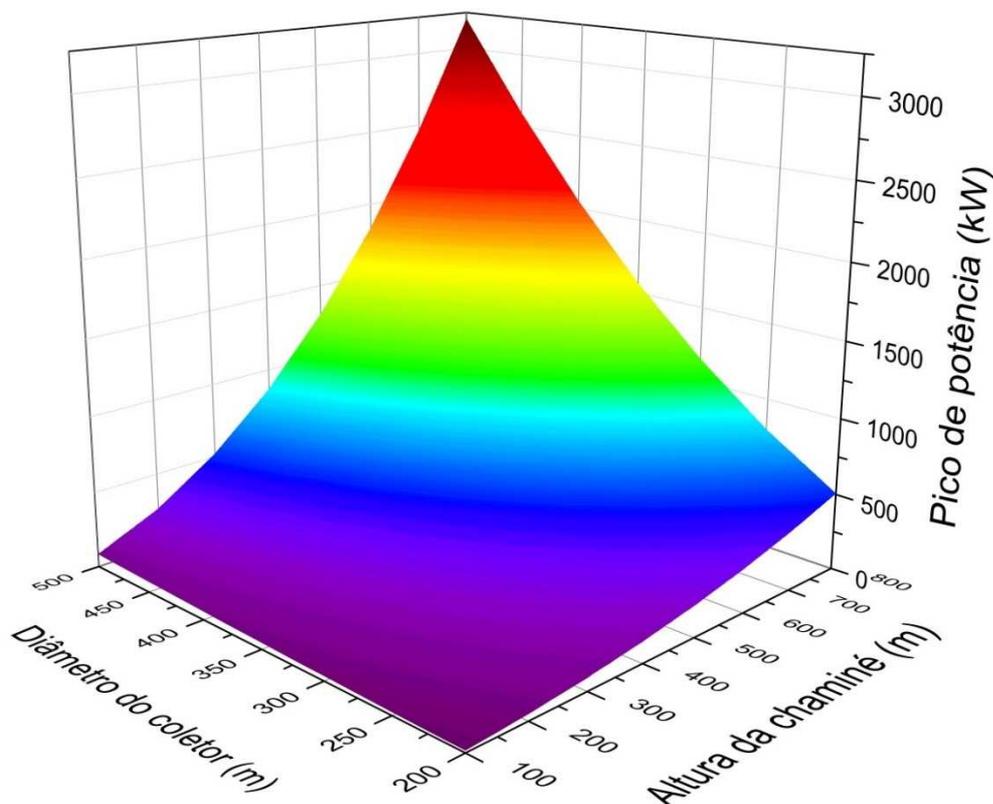


Figura 5.7: Influência da geometria da planta no pico de potência (inverno)

Com base na superfície do pico de potência de Propriá-SE, foi realizada uma análise de regressão bidimensional para o ajuste da superfície de resposta. A regressão que retornou um resultado mais confiável é dada pela equação (5.2):

$$P = z_0 + a \cdot H_{ch} + b \cdot D_c + c \cdot H_{ch}^2 + d \cdot D_c^2 + f \cdot D_c \cdot H_{ch} \quad [kW] \quad (5.2)$$

O ajuste desta superfície por esta equação retorna um coeficiente de determinação  $R^2=0,9896$ , para esta cidade. Do restante dos pontos que não se ajustam, um Chi<sup>2</sup> de 5557,04, considerado pequeno (note a escala em kW) perto do ajuste de outras equações. A tabela A.2 no apêndice A deste trabalho mostra os valores  $z_0$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e  $f$  para as demais cidades já citadas pela tabela 5.2.

### 5.3.7 Influência dos parâmetros geométricos – Energia fotovoltaica gerada

Quanto à energia fotovoltaica gerada nesta localidade (Propriá-SE), há de ser considerada a geração para a localização dos módulos na periferia, análise esta realizada neste item, e ainda a influência da posição dos módulos no raio do coletor, analisado posteriormente. A Figura 5.8 mostra a influência da geometria na geração dos módulos, por unidade de área.

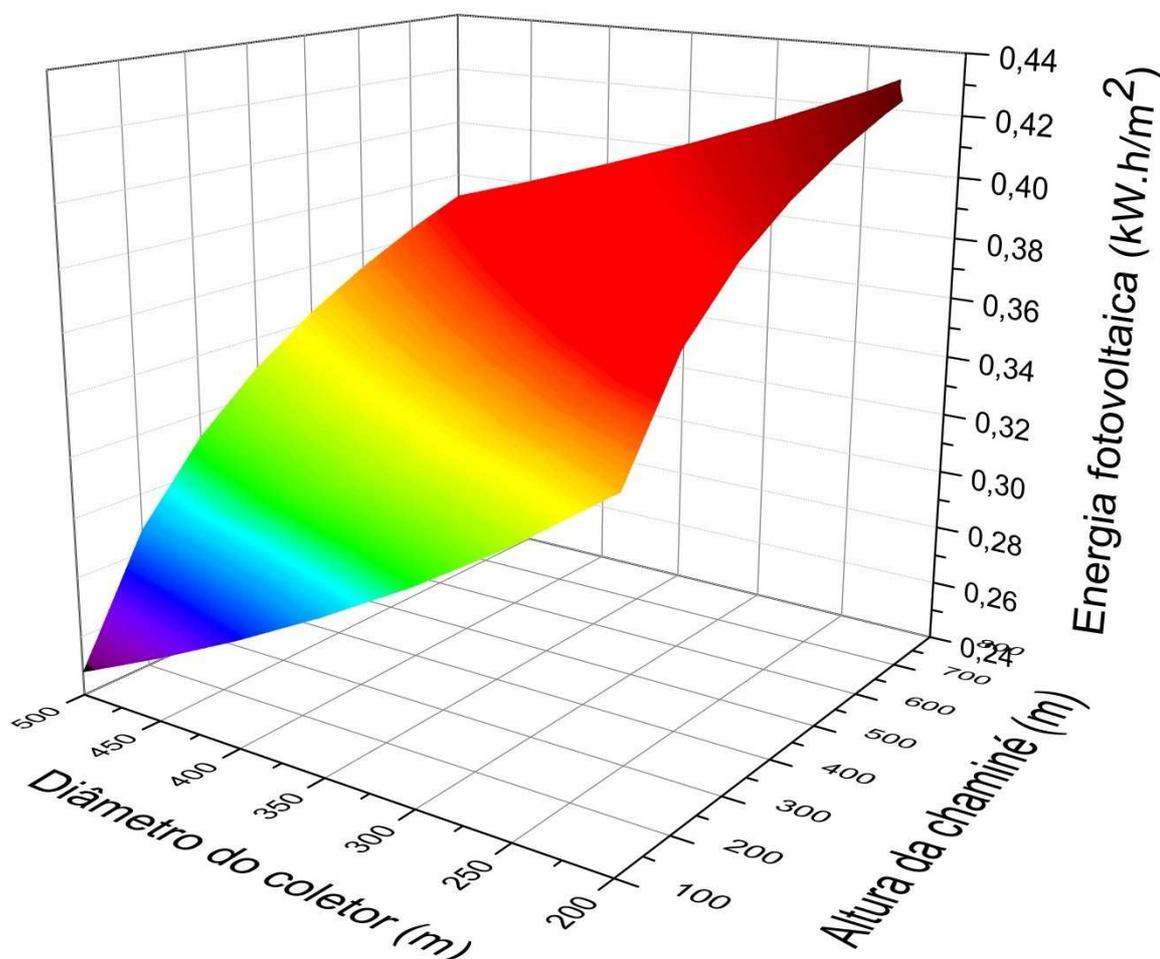


Figura 5.8: Influência da geometria da planta na energia fotovoltaica (inverno)

A superfície gerada apresenta um comportamento interessante: quanto maior a altura da chaminé, maior a energia gerada, assim como esta energia é inversamente proporcional ao diâmetro do coletor. Isto se deve ao fato da temperatura da célula ser proporcional ao

decréscimo de temperatura no módulo fotovoltaico. Quanto maior a altura da chaminé, maior a velocidade do escoamento de ar na base da chaminé, e, pelo princípio da conservação da massa no sistema, a velocidade na periferia também tende a aumentar. Devido ao mesmo princípio, quanto menor o coletor, apesar do acréscimo de temperatura em seu interior não ser tão grande, resultando em velocidades menores na base da chaminé, a razão de áreas passa a ser menor, resultando em maiores velocidades na periferia da planta. Isto implica em maiores coeficientes de transferência de calor na área onde os módulos fotovoltaicos estão instalados, e conseqüentemente o calor rejeitado nos módulos é maior, reduzindo a temperatura dos módulos e aumentando sua eficiência.

Com base na superfície da geração de energia fotovoltaica para a localidade de Propriá-SE, foi realizada uma análise de regressão bidimensional para o ajuste da superfície de resposta. A regressão que retornou um resultado mais confiável é dada pela equação (5.3):

$$E_{fv} = z_0 + a.H_{ch} + b.D_c + c.H_{ch}^2 + d.D_c^2 + f.D_c.H_{ch} \left[ \frac{kW.h}{m^2.dia} \right] \quad (5-3)$$

O ajuste desta superfície por esta equação retorna um coeficiente de determinação  $R^2=0,9933$ , para esta cidade, o que é um resultado apreciável, visto significar que 99,33% dos pontos da superfície estarem ajustados à equação proposta. Do restante que não se ajusta um  $Chi^2$  de  $1,31.10^{-5}$ , considerado extremamente pequeno perto do ajuste de outras equações, é obtido. A tabela A.3 no Apêndice A deste trabalho mostra os valores  $z_0$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e  $f$  para as demais cidades já citadas pela tabela 5.2, assim como o  $R^2$  e  $Chi^2$  para cada cidade.

#### 5.4 ANÁLISES NO TERRITÓRIO BRASILEIRO PARA O VERÃO

Os resultados e discussões apresentados são divididos em categorias, tais como gráficos de isolinhas e análise de sensibilidade para energia gerada, pico de potência e energia gerada pelos módulos fotovoltaicos.

##### 5.4.1 Análise da energia diária gerada

Com base na geometria proposta, é obtida a seguinte distribuição do potencial energético de chaminés solares no verão em todo o território brasileiro, mostrada pela Figura 5.9. Os valores obtidos são mostrados na tabela 5.3, para as principais localidades do Brasil. A energia diária gerada é expressa em MWh/dia.

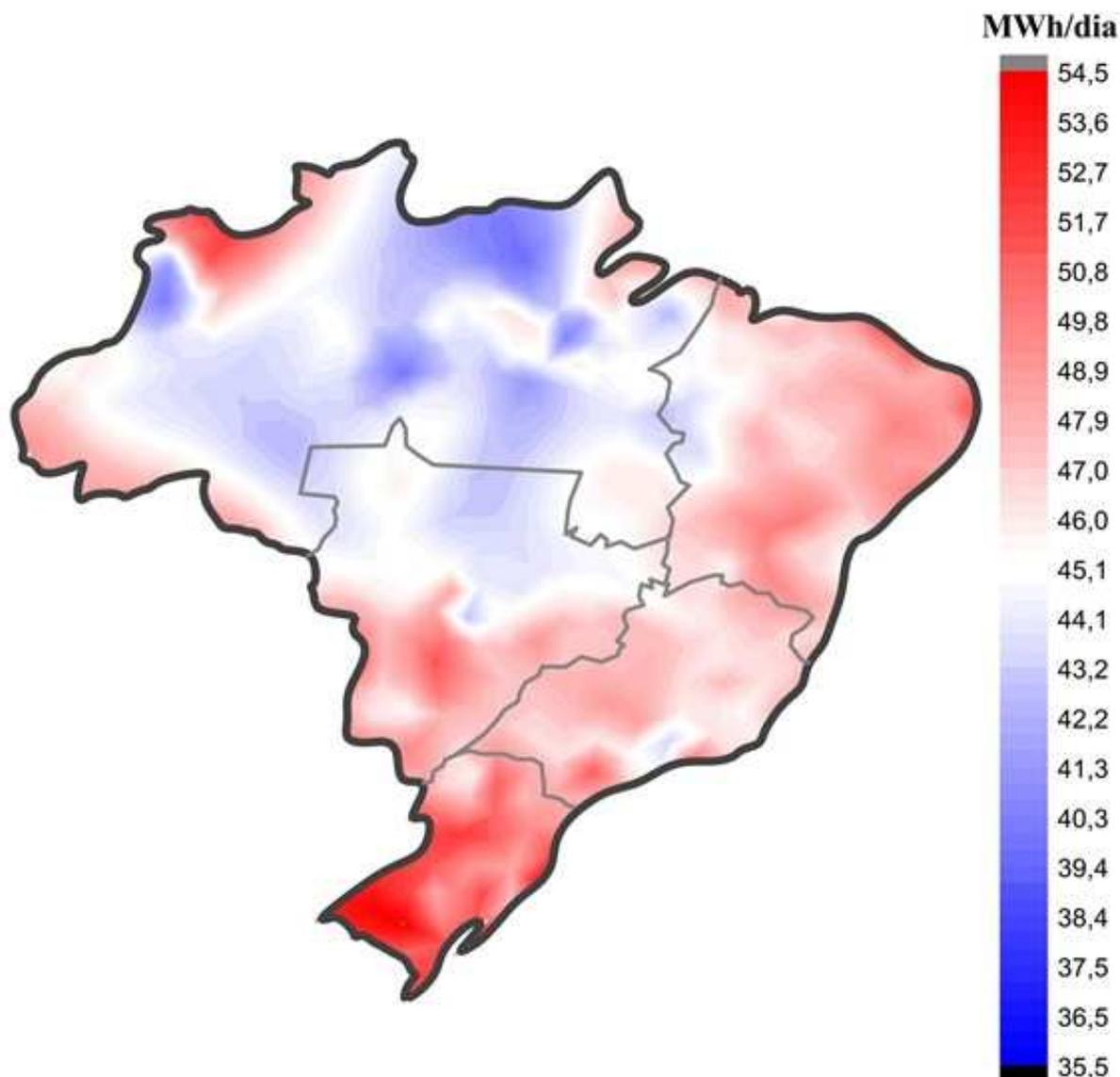


Figura 5.9: Distribuição do potencial de energia diária gerada - verão

Verifica-se um grande potencial energético no nordeste, como no inverno. Porém, a região sul, mais especificamente no sudoeste do Rio Grande do Sul, há um forte potencial energético. Algumas regiões sombreadas no norte se mantêm com baixo potencial energético também no verão, devido à cobertura amazônica.

#### 5.4.2 Análise do pico de potência gerado

Com base na geometria proposta, é obtida a seguinte distribuição do potencial de pico de potência de chaminés solares no verão em todo o território brasileiro, mostrada pela Figura 5.10. Os valores obtidos são mostrados na tabela 5.3, para as principais localidades do Brasil. O pico de potência gerado é expresso em MW, média diária.

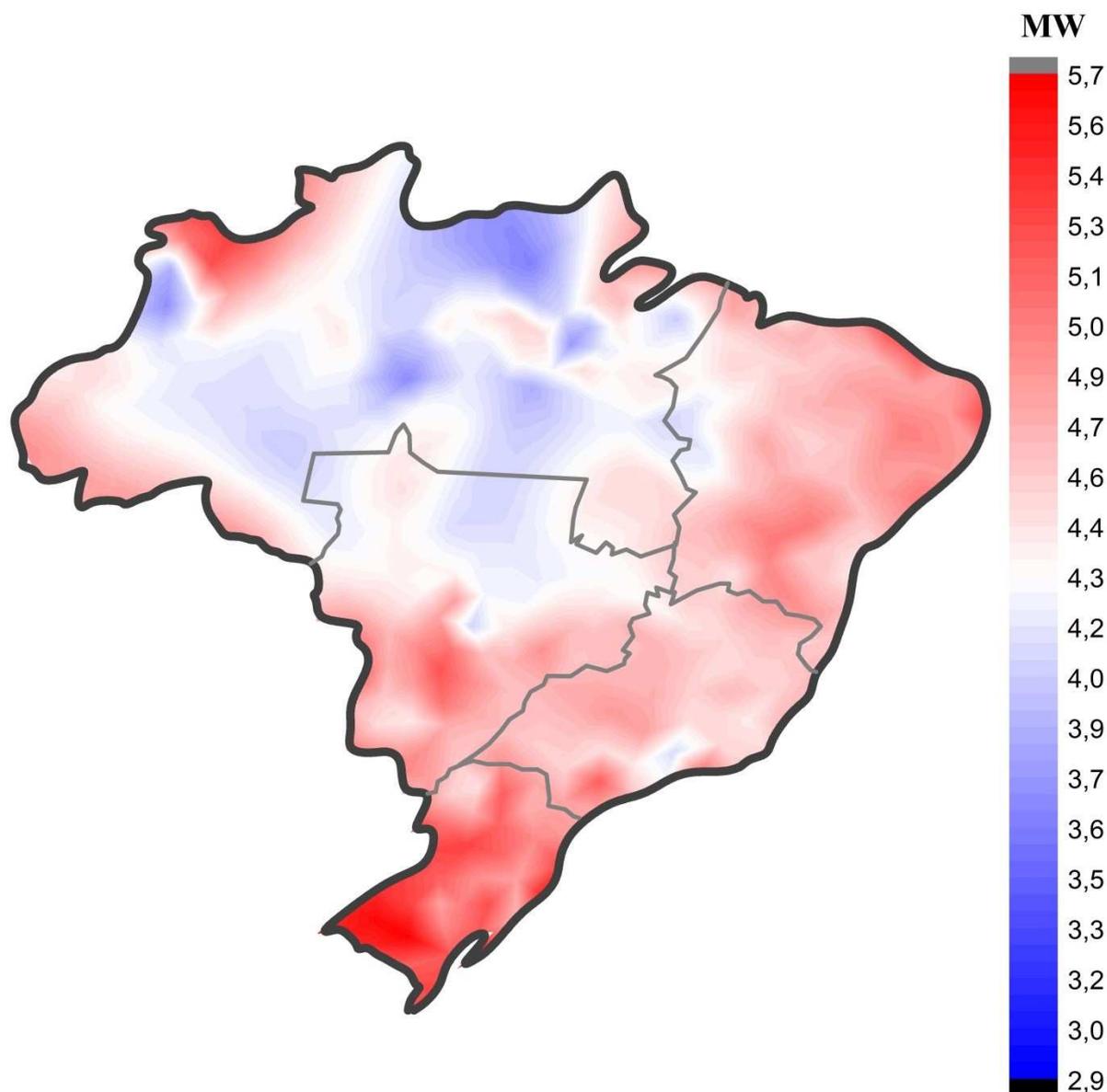


Figura 5.10: Distribuição do potencial de pico de potência diária - verão

Da mesma forma que para a energia gerada, verifica-se um grande pico de potência no nordeste e no sudoeste do Rio Grande do Sul. O Noroeste da Amazônia também se destaca no pico de potência. Algumas regiões sombreadas no norte se mantêm com baixo pico de potência, devido à cobertura amazônica.

#### 5.4.3 Análise da energia fotovoltaica gerada

Com base na geometria proposta, e incluindo as células fotovoltaicas na periferia onde a temperatura é menor, é obtida a seguinte distribuição do potencial energético apenas dos módulos fotovoltaicos, no verão, em todo o território brasileiro, mostrada pela Figura 5.11. Os resultados são expressos por unidade de área e mostrados na tabela 5.3, para as principais

localidades do Brasil. A energia diária gerada por unidade de área dos módulos fotovoltaicos é expressa em  $\text{Wh/m}^2\text{dia}$ .

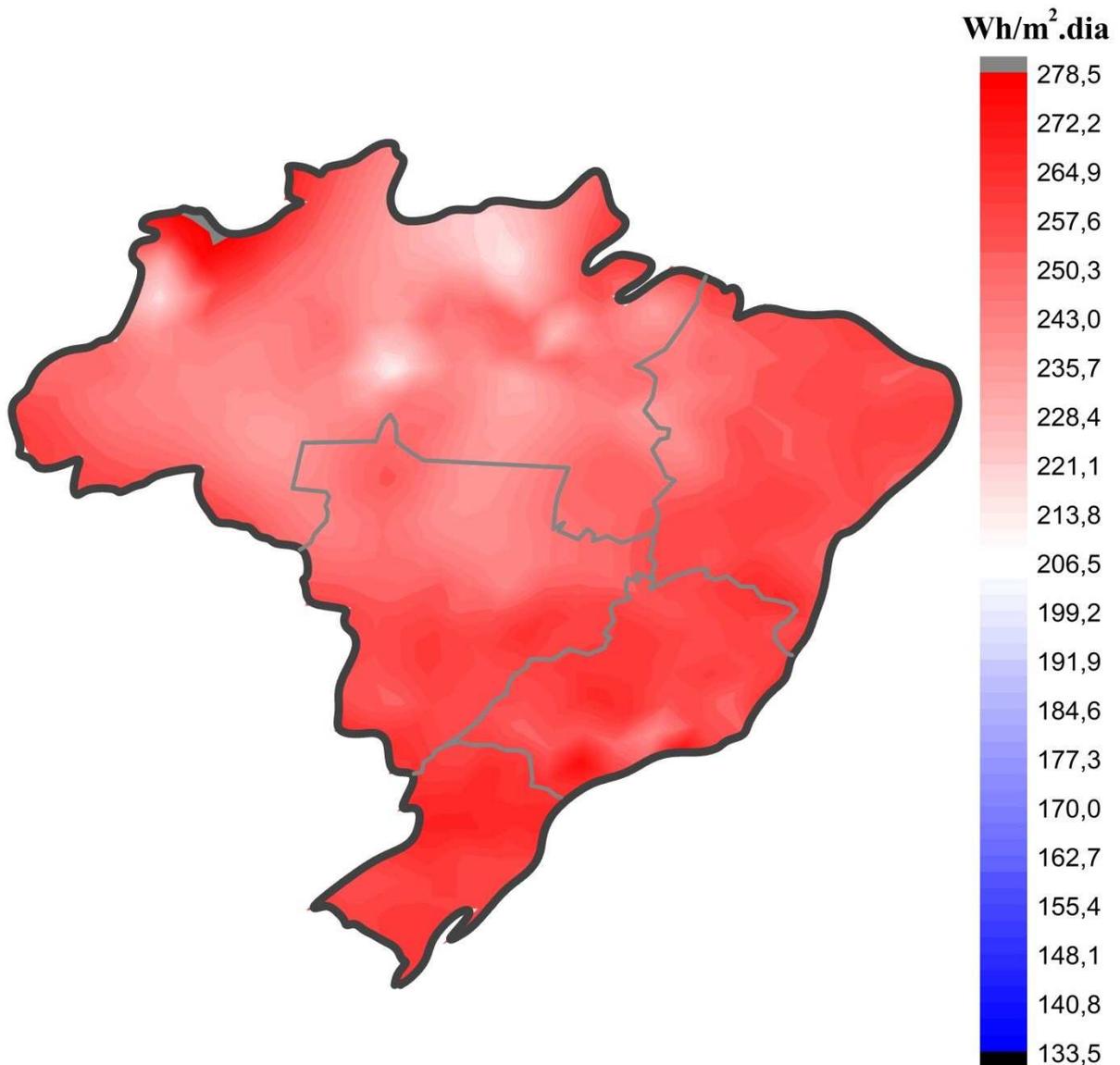


Figura 5.11: Distribuição do potencial de energia fotovoltaica diária por un. de área - verão

Verifica-se que a geração por módulos fotovoltaicos depende fortemente da radiação solar incidente e das condições ambientais, que favorecem uma temperatura maior ou menor dos módulos. A escala utilizada nos gráficos é a mesma para ser possível uma comparação ideal entre as estações do ano.

#### 5.4.4 Resumo dos resultados para o verão

A tabela 5.3 mostra os principais resultados obtidos para as capitais e para as cidades com maior incidência de radiação solar em cada estado, no verão.

Tabela 5.3 Resumo dos valores obtidos nas análises para o verão

Região	UF	Cidade	Radiação solar (MJ/m <sup>2</sup> )	Pico de potência (MW)	Energia diária gerada Planta (MWh)	Energia fotovoltaica gerada (Wh/m <sup>2</sup> )
Norte	AP	Macapá	18,60	4,55	46,47	256,56
	AP	Oiapoque	20,20	4,79	48,15	262,29
	AM	Fonte Boa	18,90	4,53	46,20	251,74
	AM	Manaus	17,20	4,29	44,45	244,63
	PA	Belém	18,40	4,47	45,73	250,46
	PA	Soure	21,00	4,84	48,44	257,15
	RO	Porto Velho	15,20	4,02	42,47	233,07
	RO	Vilhena	16,50	4,20	43,78	241,88
	RR	Boa Vista	18,10	4,41	45,29	247,89
	TO	Palmas	18,90	4,55	46,34	253,30
TO	Taguatinga	19,70	4,66	47,17	256,97	
Nordeste	AL	Pão De Açúcar	20,70	4,75	47,68	252,99
	AL	Maceió	22,00	4,93	49,03	252,42
	BH	Salvador	21,90	4,96	49,40	258,78
	BH	Santa Rita De Cássia	22,10	4,99	49,62	258,83
	CE	Fortaleza	21,50	4,90	48,93	257,24
	CE	Quixadá	22,00	4,98	49,46	258,37
	MA	São Luiz	20,70	4,78	47,99	255,83
	MA	Turiaçu	20,30	4,72	47,57	255,12
	PB	João Pessoa	22,80	5,11	50,48	259,53
	PB	São Gonçalo	22,80	5,11	50,48	260,45
	PE	Barreiros	23,90	5,25	51,48	257,36
	PE	Recife	19,70	4,65	47,06	255,49
	PI	Paulistana	20,70	4,78	48,04	257,14
	PI	Teresina	19,40	4,60	46,69	252,89
	RN	Natal	23,00	5,07	50,03	252,26
RN	Santa Cruz (Rn)	22,40	4,98	49,40	252,62	
SE	Aracajú	23,30	5,11	50,26	250,21	
SE	Propriá	22,60	5,01	49,53	250,88	
Centro Oeste	DF	Brasília	16,40	4,32	44,97	252,62
	GO	Goiás	18,40	4,52	46,28	256,17
	GO	Mineiros	21,00	4,90	49,02	264,54
	MG	Coxipó Da Ponte	19,10	4,55	46,39	252,85
	MG	Cuiabá	23,90	5,25	51,43	256,82
	MS	Campo Grande	19,40	4,62	46,85	255,13
	MS	Fazenda Rio Negro	23,20	5,17	50,86	259,99

Sudeste	ES	Conceição Da Barra	20,00	4,72	47,57	258,33
	ES	Vitória	19,60	4,66	47,15	256,75
	MG	Belo Horizonte	18,40	4,52	46,24	256,39
	MG	Ouro Fino	21,90	5,02	49,93	265,20
	RJ	Cabo Frio	21,30	4,88	48,71	257,57
	RJ	Rio De Janeiro	20,20	4,72	47,56	256,58
	SP	Monte Alegre Do Sul	22,60	5,17	51,10	270,15
	SP	São Paulo	17,60	4,44	45,75	255,83
Sul	PR	Curitiba	19,70	4,73	47,77	263,19
	PR	Toledo	23,00	5,21	51,30	266,97
	RS	Passo Fundo	26,40	5,64	54,36	253,57
	RS	Porto Alegre	23,30	5,18	51,02	260,84
	SC	Curitibanos	24,30	5,41	52,74	266,22
	SC	Florianópolis	20,60	4,86	48,75	265,26

#### 5.4.5 Influência dos parâmetros geométricos – Energia gerada

Dados da cidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, que retornou o maior valor para energia gerada no verão, foram utilizados para gerar uma superfície que mostra o comportamento dos parâmetros geométricos na energia diária gerada. Para confeccionar tal superfície, foram realizadas 56 simulações, com diâmetro do coletor variando de 200 a 500 metros, com incremento de 50 metros entre simulações, e alturas da chaminé variando de 100 a 800 metros, com incrementos de 100 metros. A superfície encontrada pode ser visualizada na Figura 5.12.

Percebe-se, ao analisar este gráfico tridimensional, que, para pequenas alturas de chaminé, a variação do diâmetro do coletor não implica em aumento significativo na geração de potência. Mesmo utilizando um coletor com grande diâmetro, a energia gerada não aumenta significativamente. De forma semelhante, ao manter um diâmetro pequeno de coletor, o aumento da altura da chaminé já implica em um aumento de energia gerada, mas ainda de forma não muito significativa. O aumento passa a ser muito significativo quanto maior a altura da chaminé e quanto maior o diâmetro do coletor, não havendo um ponto ótimo para a geração de energia.

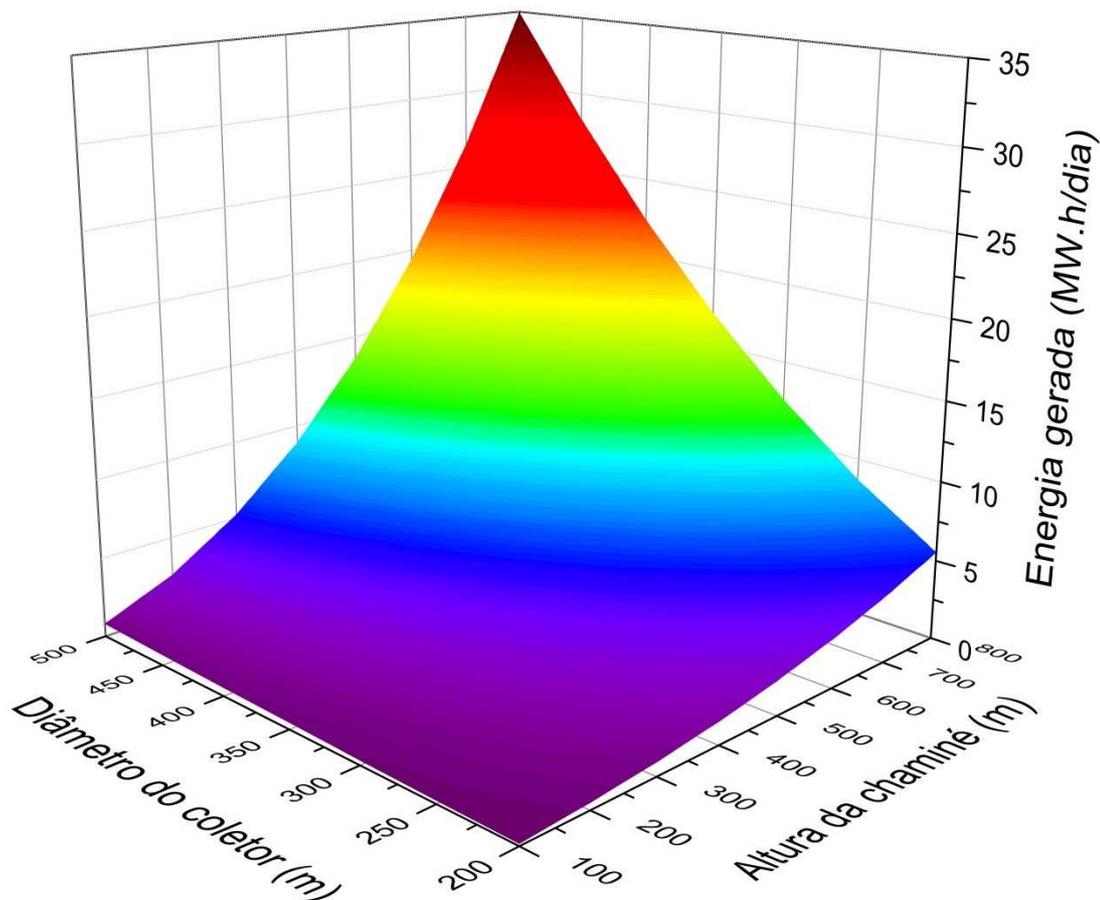


Figura 5.12: Influência da geometria da planta na energia gerada (Verão)

Com base na superfície de Passo Fundo - RS foi realizada uma análise de regressão bidimensional para o ajuste da superfície de resposta. Para tanto, foram testadas várias equações bidimensionais já embutidas no software, e a que retornou um resultado mais confiável é dada pela equação (5.1).

O ajuste desta superfície por esta equação retorna um coeficiente de determinação  $R^2=0,98806$ . Do restante que não se ajusta um  $\text{Chi}^2$  de 0,755 é obtido, e é considerado pequeno perto do ajuste de outras equações. A tabela B.1 no apêndice B deste trabalho mostra os valores  $z_0$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e  $f$  para as demais cidades já citadas pela tabela 5.3.

#### 5.4.6 Influência dos parâmetros geométricos – Pico de potência

Quanto ao pico de potência gerada no território brasileiro, no inverno, também se destaca a cidade de Passo Fundo-RS, o que é esperado, visto a energia gerada ser dependente da soma das potências geradas ao longo do dia. A Figura 5.13 mostra a influência da

geometria no pico de potência. Verifica-se também que a altura da chaminé influencia mais significativamente este pico do que o diâmetro do coletor, que passa a contribuir mais quanto maior a altura da chaminé.

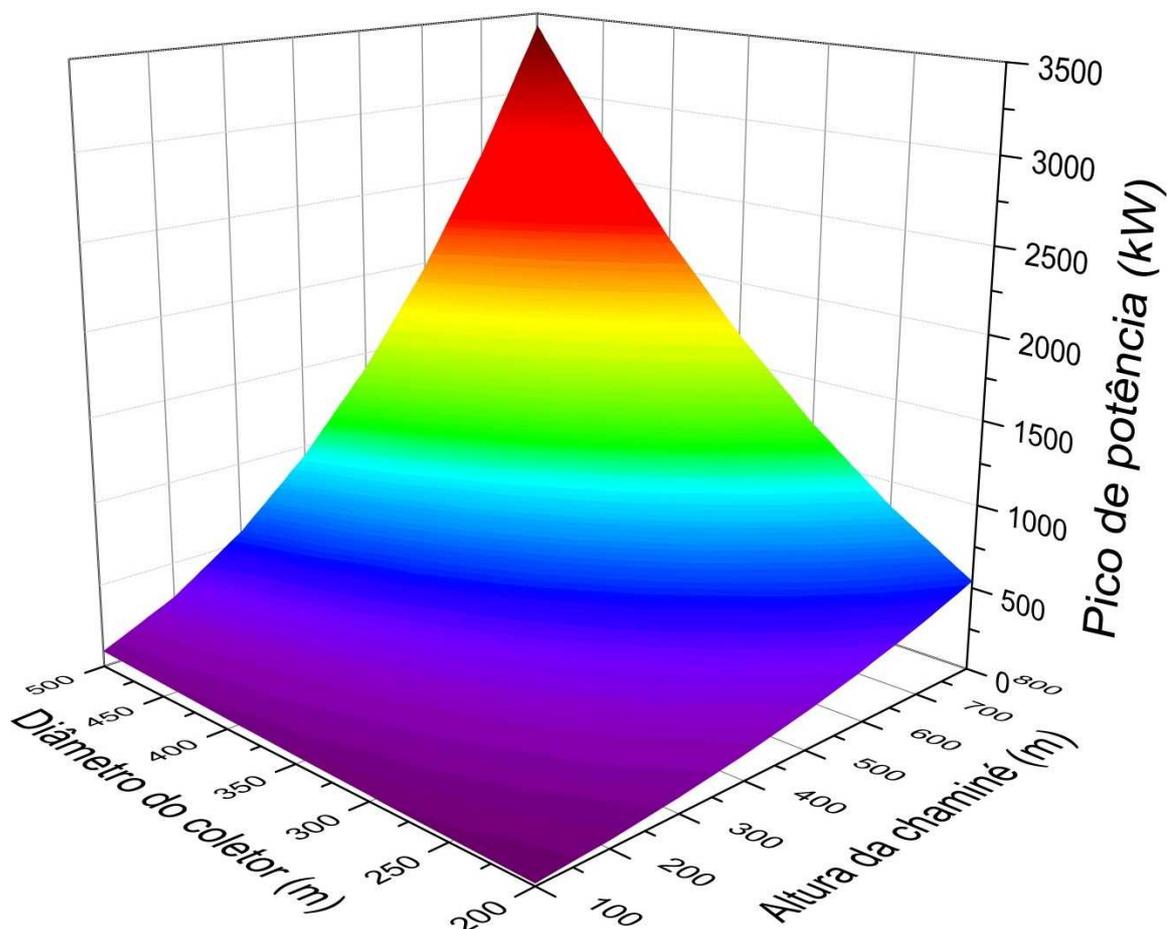


Figura 5.13: Influência da geometria da planta no pico de potência (Verão)

Com base na superfície do pico de potência de Passo Fundo–RS, foi realizado um ajuste da superfície de resposta. A regressão que retornou um resultado mais confiável é dada pela equação (5.2).

O ajuste desta superfície por esta equação retorna um coeficiente de determinação  $R^2=0,99011$ , para esta cidade. Do restante que não se ajusta um  $\text{Chi}^2$  de 6052,60, considerado pequeno (note a unidade em kW) perto do ajuste de outras equações. A tabela B.2 no apêndice B deste trabalho mostra os valores  $z_0$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e  $f$  para as demais cidades já citadas pela tabela 5.3.

#### 5.4.7 Influência dos parâmetros geométricos – Energia fotovoltaica gerada

Quanto à energia fotovoltaica gerada no território brasileiro, há de ser considerada a geração para a localização dos módulos na periferia, análise esta realizada neste item, e ainda a influência da posição dos módulos no raio do coletor, analisado posteriormente. A Figura 5.14 mostra a influência da geometria na geração dos módulos, por unidade de área, para a cidade de Passo Fundo – RS.

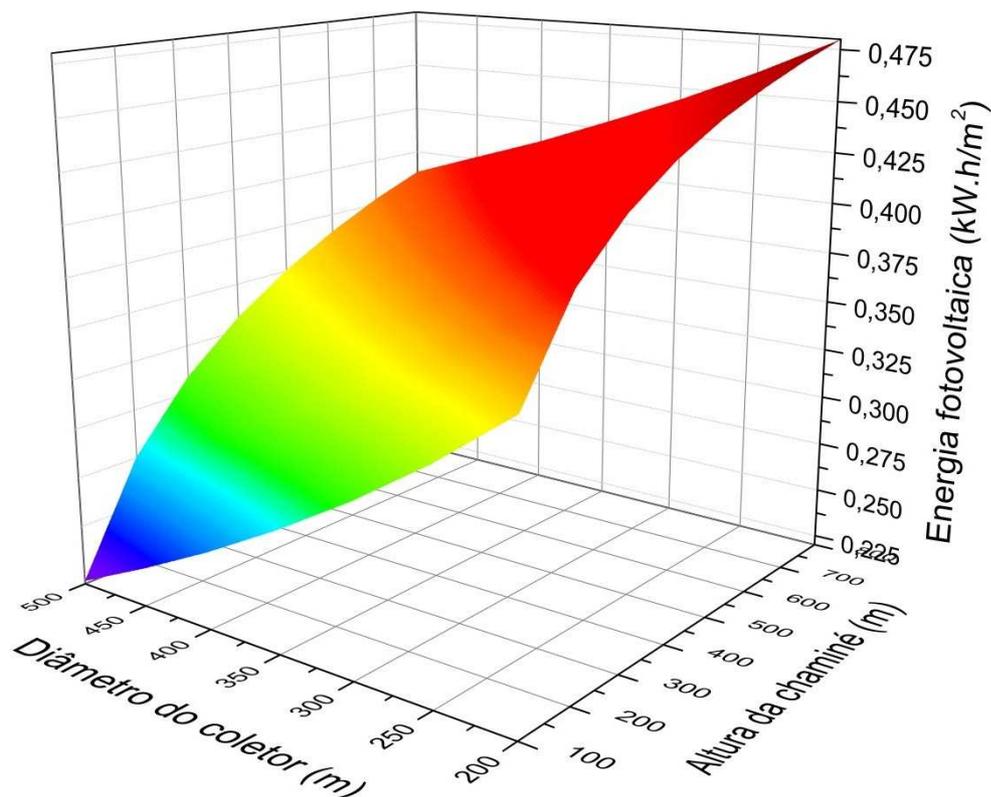


Figura 5.14: Influência da geometria da planta na energia fotovoltaica (Verão)

A superfície gerada apresenta o mesmo comportamento para o inverno. Com base na superfície do pico de potência de Passo Fundo–RS, foi realizado um ajuste da superfície de resposta. A regressão que retornou um resultado mais confiável é dada pela equação (5.3).

O ajuste desta superfície por esta equação retorna um coeficiente de determinação  $R^2=0,99322$ , para esta cidade. Do restante que não se ajusta um  $\text{Chi}^2$  de  $2,43 \cdot 10^{-5}$ , considerado pequeno perto do ajuste de outras equações. A tabela B.3 no apêndice B deste trabalho mostra os valores  $z_0$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e  $f$  para as demais cidades já citadas pela tabela 5.3.

## 5.5 ANÁLISES NO TERRITÓRIO BRASILEIRO – MÉDIA ANUAL

Para verificar a real viabilidade de um projeto destes em quaisquer territórios, faz-se necessário conhecer a energia diária gerada para uma média anual. A seguir são apresentados os gráficos de isolinhas para a energia diária gerada pela chaminé solar, o pico de potência e a energia diária por unidade de área dos módulos fotovoltaicos considerando a média anual.

### 5.5.1 Análise da energia diária gerada

Com base na geometria proposta, é obtida a seguinte distribuição do potencial energético de chaminés solares – média anual – em todo o território brasileiro, mostrada pela Figura 5.15. Os valores obtidos são mostrados na tabela 5.4, para as principais localidades do Brasil. A energia diária gerada é expressa em MWh/dia.

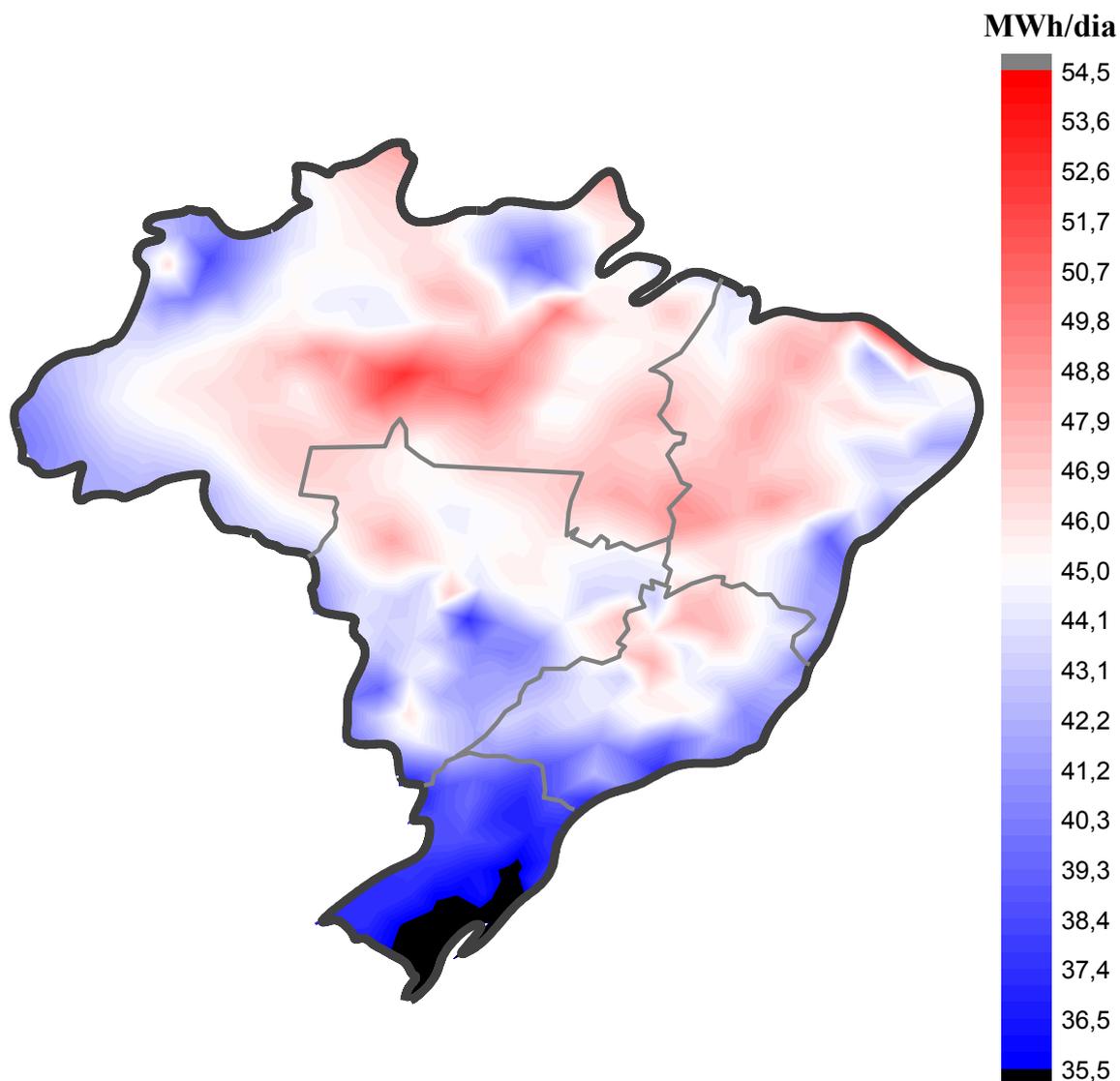


Figura 5.15: Distribuição do potencial de energia diária gerada – média anual

Verifica-se um grande potencial energético no norte e no nordeste. A região sul possui um fraco potencial para geração, considerando uma média anual. Nota-se que, pelo fato da escala ser constante em todos os gráficos de isolinhas para este parâmetro, há uma região, em preto no mapa, que possui uma geração diária de energia menor que 35,5 MWh/dia. Algumas regiões sombreadas no norte se mantêm com baixo potencial energético ao longo do ano, devido à cobertura amazônica.

### 5.5.2 Análise do pico de potência gerada

Com base na geometria proposta, é obtida a seguinte distribuição do potencial de pico de potência de chaminés solares – média anual – em todo o território brasileiro, mostrada pela Figura 5.16. Os valores obtidos são mostrados na tabela 5.4, para as principais localidades do Brasil. O pico de potência é expresso em MW, média diária.

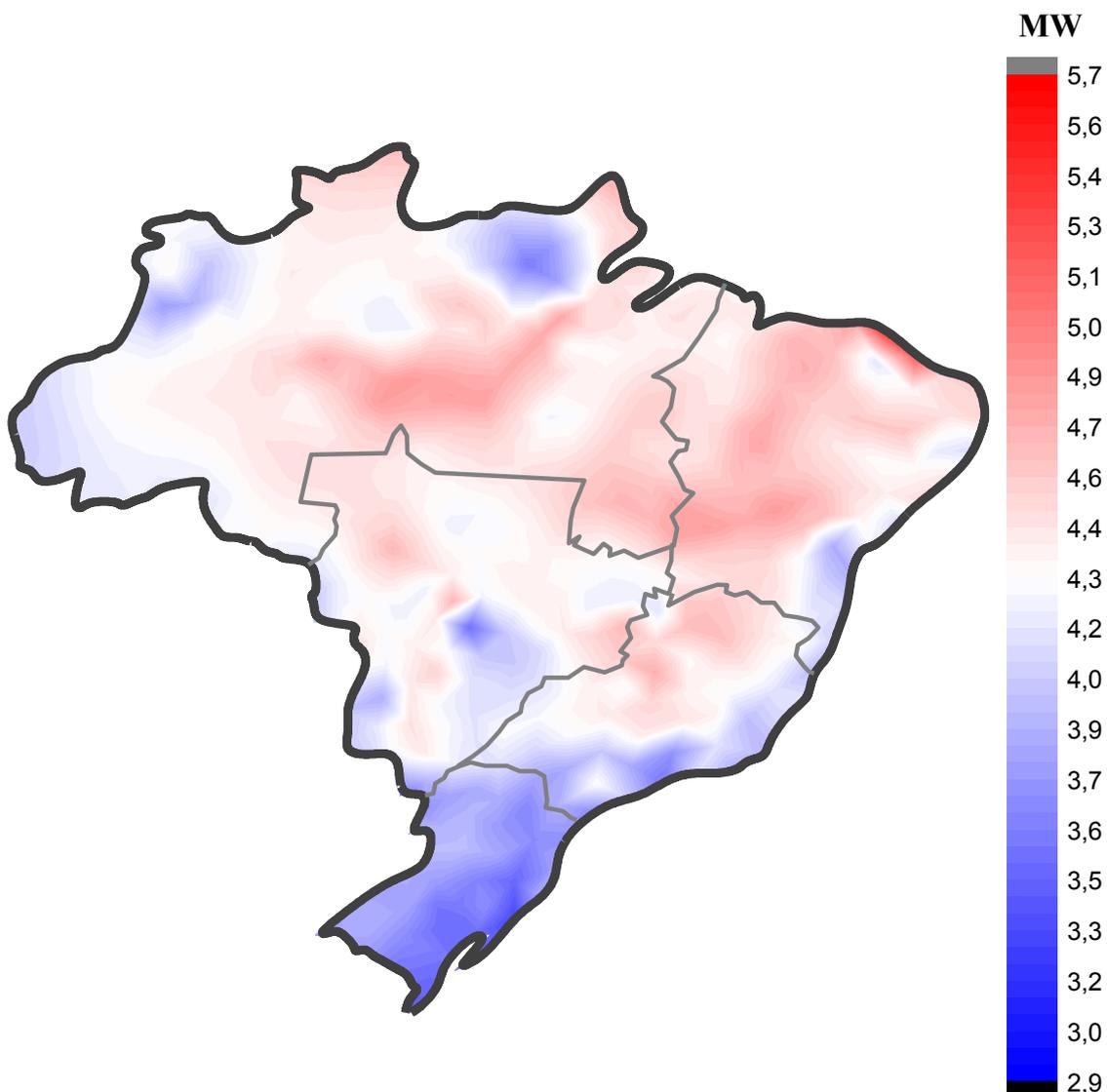


Figura 5.16: Distribuição do potencial de pico de potência diária – média diária

Da mesma forma que para a energia gerada, verifica-se na Figura 5.16 um grande pico de potência no nordeste e no norte. O extremo norte e noroeste da Amazônia possuem algumas regiões sombreadas, que reduzem o pico de potência, devido à cobertura amazônica.

### 5.5.3 Análise da energia fotovoltaica gerada

Com base na geometria proposta, e incluindo as células fotovoltaicas na periferia onde a temperatura é menor, é obtida a seguinte distribuição do potencial energético apenas dos módulos fotovoltaicos – média anual – em todo o território brasileiro, mostrada pela Figura 5.17. Os resultados são expressos por unidade de área e mostrados na tabela 5.4, para as principais localidades do Brasil. A energia diária gerada por unidade de área dos módulos fotovoltaicos é expressa em Wh/m<sup>2</sup>dia.

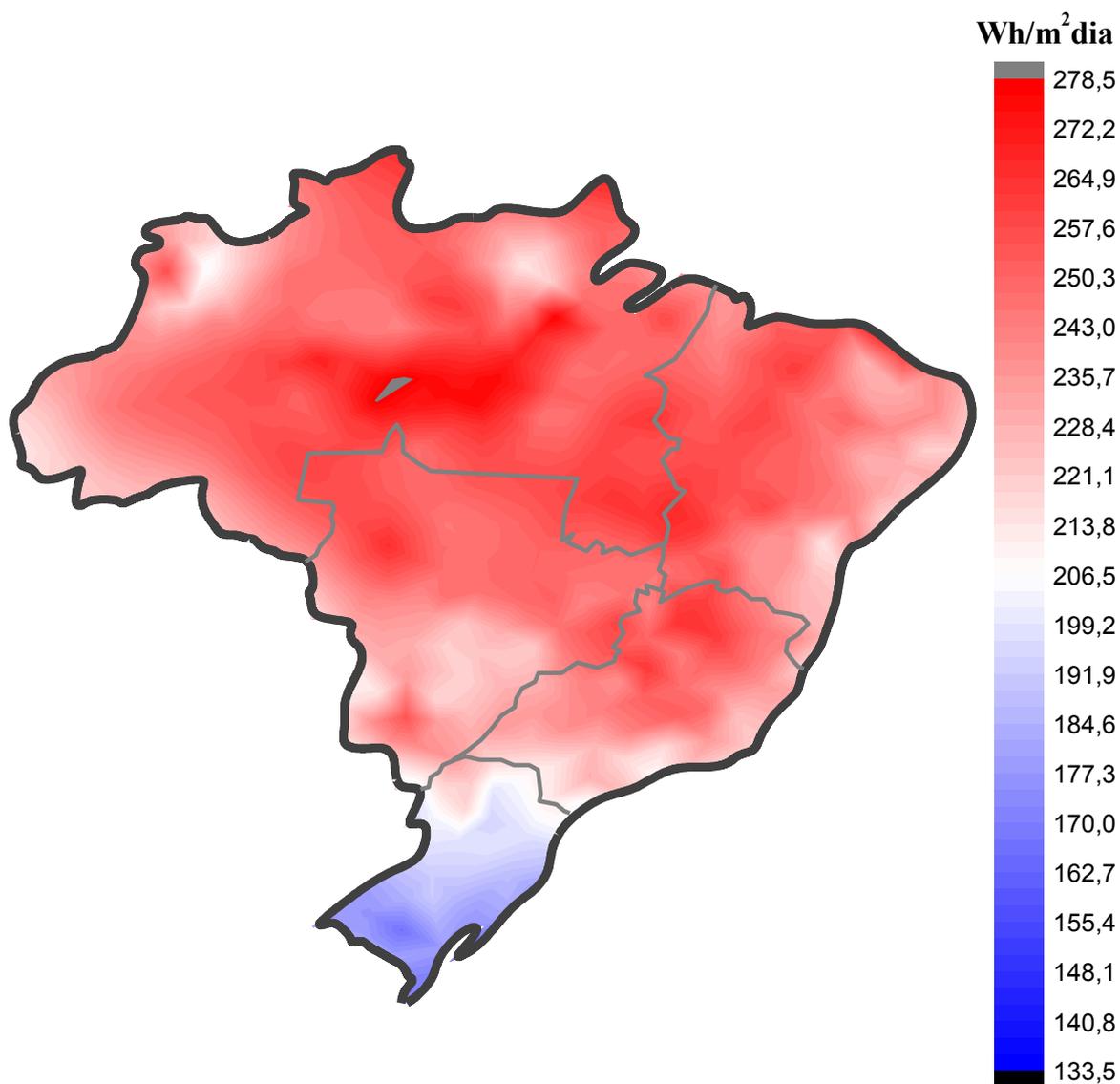


Figura 5.17: Potencial de energia fotovoltaica diária por unidade de área – média anual

Verifica-se na Figura 5.17 que a geração por módulos fotovoltaicos depende fortemente da radiação solar incidente e das condições ambientais ao longo do ano. A escala utilizada nos gráficos é a mesma para ser possível uma comparação ideal entre as estações do ano e a média anual. Nota-se que a região cinza no norte possui uma geração de energia diária por unidade de área superior a 278,5 Wh/m<sup>2</sup>dia.

#### 5.5.4 Resumo dos resultados – média anual

A tabela 5.4 mostra os principais resultados obtidos para as capitais e para as cidades com maior incidência de radiação solar em cada estado, utilizando uma média anual.

Tabela 5.4 Resumo dos valores obtidos nas análises – média anual

Região	UF	Cidade	Radiação solar (média anual) (MJ/m <sup>2</sup> )	Pico de potência (MW)	Energia diária gerada Planta (MWh)	Energia foto- voltaica gerada (Wh/m <sup>2</sup> )
Norte	AP	Macapá	18,18	4,45	45,42	250,82
	AP	Oiapoque	18,76	4,44	44,72	243,58
	AM	Fonte Boa	17,83	4,27	43,57	237,42
	AM	Manaus	17,68	4,41	45,68	251,39
	PA	Belém	18,18	4,41	45,19	247,52
	PA	Soure	19,48	4,49	44,94	238,59
	RO	Porto Velho	16,90	4,47	47,22	259,14
	RO	Vilhena	17,22	4,39	45,69	252,39
	RR	Boa Vista	17,82	4,34	44,58	244,01
	TO	Palmas	19,23	4,63	47,16	257,77
	TO	Taguatinga	20,33	4,81	48,69	265,24
Nordeste	AL	Pão De Açúcar	18,58	4,26	42,78	227,02
	AL	Maceió	19,02	4,26	42,38	218,19
	BH	Salvador	19,20	4,35	43,31	226,88
	BH	Santa Rita Cássia	21,11	4,77	47,39	247,22
	CE	Fortaleza	20,33	4,64	46,28	243,28
	CE	Quixadá	20,43	4,62	45,94	239,97
	MA	São Luiz	19,13	4,42	44,34	236,37
	MA	Turialça	18,93	4,40	44,35	237,84
	PB	João Pessoa	19,78	4,44	43,80	225,20
	PB	São Gonçalo	21,63	4,85	47,90	247,13
	PE	Barreiros	19,68	4,32	42,38	211,86
	PE	Recife	17,62	4,15	42,08	228,48
	PI	Paulistana	19,45	4,50	45,14	241,62
	PI	Teresina	19,75	4,68	47,53	257,45
	RN	Natal	20,38	4,49	44,34	223,57
	RN	Santa Cruz (Rn)	19,52	4,34	43,04	220,11
	SE	Aracajú	19,69	4,32	42,48	211,47
SE	Propriá	22,60	5,01	49,53	250,89	

Centro Oeste	DF	Brasília	15,38	4,05	42,18	236,96
	GO	Goiás	17,36	4,27	43,66	241,67
	GO	Mineiros	17,49	4,08	40,83	220,35
	MG	Coxipó Da Ponte	18,12	4,32	44,00	239,83
	MG	Cuiabá	23,24	5,10	50,01	249,75
	MS	Campo Grande	17,76	4,23	42,89	233,55
	MS	Faz. Rio Negro	18,58	4,14	40,72	208,16
Sudeste	ES	Conceição Barra	17,47	4,12	41,55	225,61
	ES	Vitória	17,57	4,18	42,26	230,12
	MG	Belo Horizonte	17,88	4,39	44,94	249,20
	MG	Ouro Fino	17,67	4,05	40,28	213,94
	RJ	Cabo Frio	18,11	4,15	41,41	218,98
	RJ	Rio De Janeiro	16,70	3,90	39,32	212,13
	SP	Monte Alegre Sul	18,52	4,24	41,86	221,35
SP	São Paulo	13,88	3,50	36,09	201,81	
Sul	PR	Curitiba	15,09	3,62	36,59	201,63
	PR	Toledo	17,28	3,91	38,55	200,62
	RS	Passo Fundo	18,10	3,87	37,27	173,85
	RS	Porto Alegre	15,43	3,43	33,80	172,78
	SC	Curitibanos	16,68	3,71	36,21	182,78
	SC	Florianópolis	15,25	3,60	36,09	196,37

## 5.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Apesar de já analisada a influência do diâmetro do coletor e da altura da chaminé na energia gerada pela chaminé e pelos módulos fotovoltaicos, assim como no pico de potência gerada, é interessante verificar a influência da qualidade do material vítreo nestas variáveis e ainda verificar a influência da posição dos módulos fotovoltaicos relativa ao centro do coletor na energia gerada pelos módulos fotovoltaicos.

### 5.6.1 Análise de sensibilidade do material da cobertura

Para realizar esta análise, foi escolhida a cidade de Passo Fundo – RS para o clima de verão. A geometria escolhida para esta análise consiste em uma torre de 500 m de altura e um coletor de 1000 m de diâmetro. Como já citado na revisão bibliográfica deste trabalho, muitos autores se referem a vidros com excelentes qualidades ópticas, com coeficientes de extinção na ordem de  $4.m^{-1}$ , porém, não citam qual a sua catalogação por órgão na área destes materiais. Para poder realizar uma análise mais coerente com a realidade, são utilizados valores obtidos pelo NFRC (2001) – US National Fenestration Rating Council – que podem ser observados na tabela 5.5.

Tabela 5.5 Características termofísicas e geométricas de vidros comuns “ultra claros”

ID	NFRC ID	t (mm)	$\rho$ (-)	$\varepsilon$ (m <sup>-1</sup> )	Produto t. $\varepsilon$ (-)
#1	5002	3,276	0,080	27,0	0,088
#2	5001	3,911	0,080	23,0	0,090
#3	5003	4,673	0,080	19,7	0,092
#4	9813	4,851	0,080	20,3	0,098
#5	9814	5,842	0,079	17,6	0,103
#6	3906	3,810	0,076	36,5	0,139

Fonte: NFRC (2001)

Onde  $t$  (mm) é a espessura do material vítreo,  $\rho$  é a refletividade do vidro e  $\varepsilon$  (m<sup>-1</sup>) é o coeficiente de extinção do material vítreo.

Os vidros foram ordenados pelo produto da espessura com o coeficiente de extinção, pois a transmissividade do material depende fortemente destes dois parâmetros, ou seja, se um vidro possui o dobro da espessura e um coeficiente de extinção de 50% em relação a outro material, é esperado que estes dois materiais possuam a mesma transmissividade. Os resultados da influência do produto da espessura pelo coeficiente de extinção podem ser visualizados nas Figuras 5.18 a 5.20.

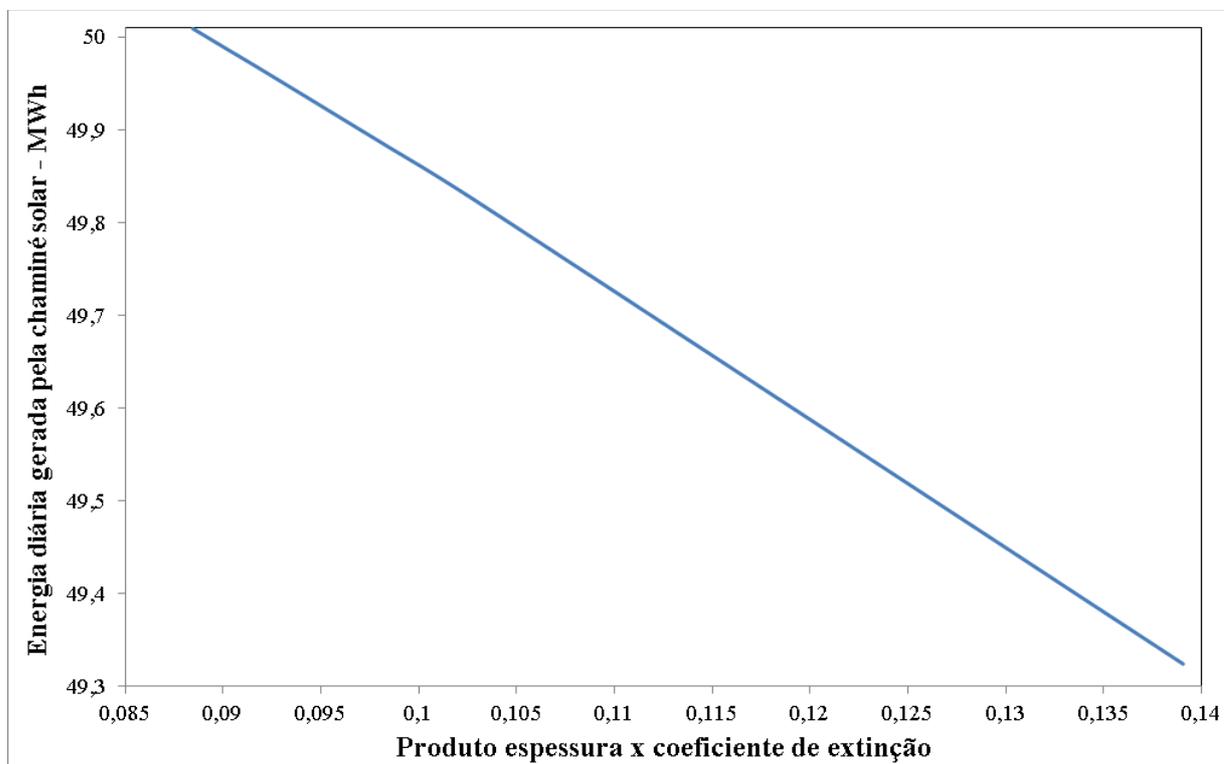


Figura 5.18: Influência das propriedades ópticas e geométricas do vidro na energia diária gerada pela chaminé solar

Observa-se na Figura 5.18 que, quanto maior o produto da espessura do material vítreo pelo coeficiente de extinção do vidro utilizado, menor a energia diária gerada. Isto se deve ao fato das duas variáveis afetarem diretamente o comportamento térmico do vidro, ou seja, quanto maior a espessura do material, maior o calor absorvido pelo mesmo, assim como o coeficiente de extinção, se o mesmo aumenta, aumenta a capacidade do material em absorver calor.

A Figura 5.19 mostra a influência destes mesmos parâmetros no pico de potência gerada pela chaminé solar, e a Figura 5.20 apresenta o comportamento da geração diária de energia pelos módulos fotovoltaicos em função destes parâmetros. Observa-se que a geração diária de energia pelos módulos fotovoltaicos são muito mais sensíveis à variação da espessura e do coeficiente de extinção, visto esta geração de energia ser diretamente proporcional a radiação solar transmitida. Nota-se que a análise apresenta os resultados por unidade de área dos módulos.

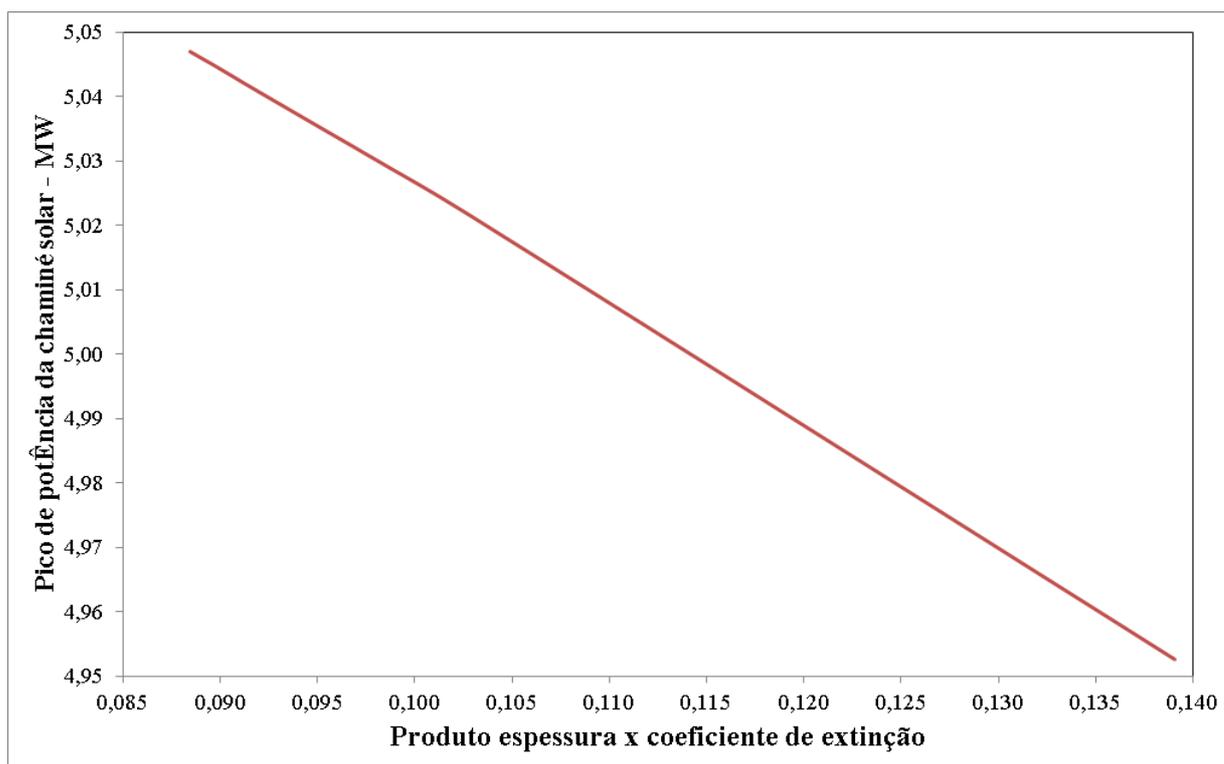


Figura 5.19: Influência das propriedades ópticas e geométricas do vidro no pico de potência gerado pela chaminé solar

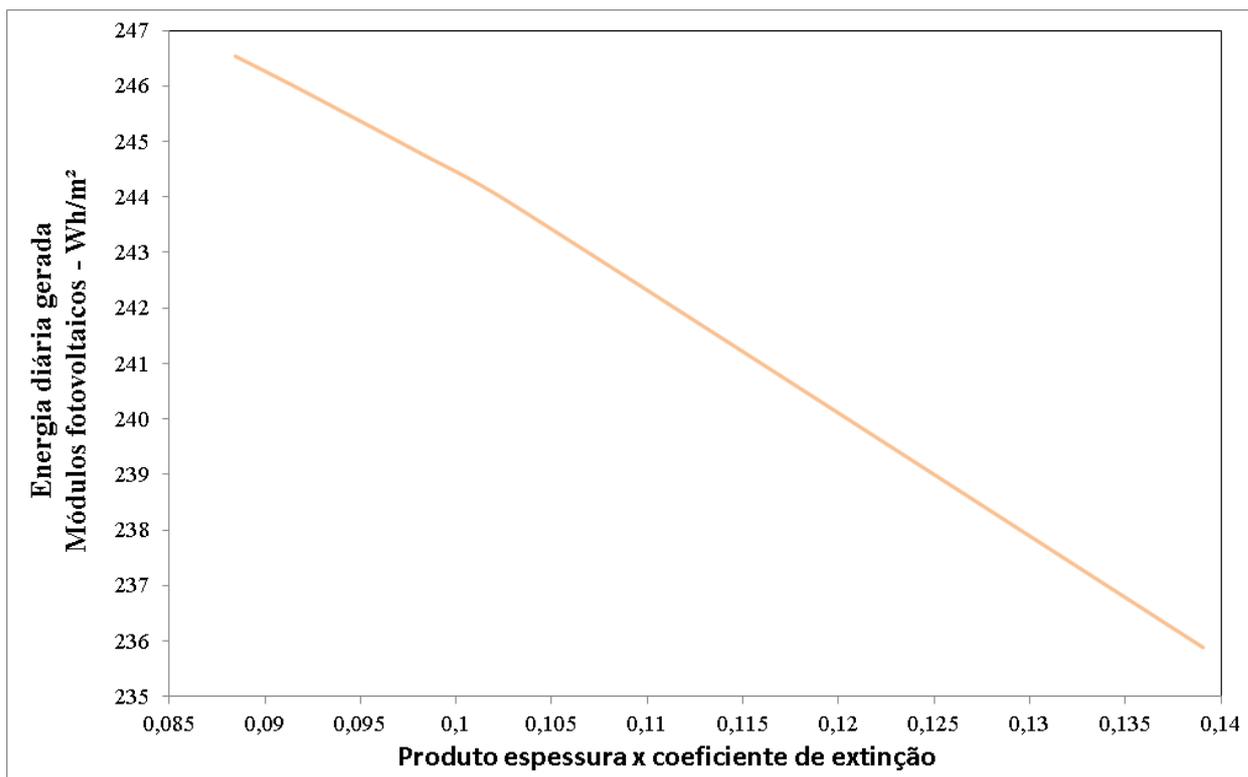


Figura 5.20: Influência das propriedades ópticas e geométricas do vidro na energia diária gerada por unidade de área dos módulos fotovoltaicos.

Como os vidros catalogados pela NFRC (2001) possuem valores de produto do coeficiente de extinção pela espessura muito próximos, devido ao fato de não existir um padrão de espessura, e ser importante mostrar o efeito da variação do coeficiente de extinção nos parâmetros de saída, é realizada uma análise considerando uma espessura de vidro constante, variando-se apenas o coeficiente de extinção. Para esta espessura é atribuído o valor de 4mm, a refletividade do material vítreo é 0,08, os demais parâmetros de simulação e resultados são mostrados na tabela 5.6.

Tabela 5.6 Parâmetros de simulação e resultados de sensibilidade óptica

$\epsilon \text{ (m}^{-1}\text{)}$	Produto $t.\epsilon \text{ (-)}$	Energia (MWh/dia)	Pico (MW)	EFV (kWh/m <sup>2</sup> )
4	0,016	50,8302	5,15492	0,255871
10	0,040	50,5775	5,12014	0,253459
20	0,080	50,1141	5,0565	0,247958
32	0,128	49,4827	4,9694	0,238545
50	0,200	48,3615	4,8147	0,217398
100	0,400	43,8394	4,1901	0,091529

Para manter as curvas de energia diária gerada pela chaminé solar, pelos módulos fotovoltaicos e o pico de potência diário na mesma Figura (Fig. 5.21) de forma a ser possível a comparação visual do comportamento de cada parâmetro, uma escala foi ajustada para cada parâmetro analisado, que pode ser visualizada na legenda do gráfico mostrado na Figura 5.21.

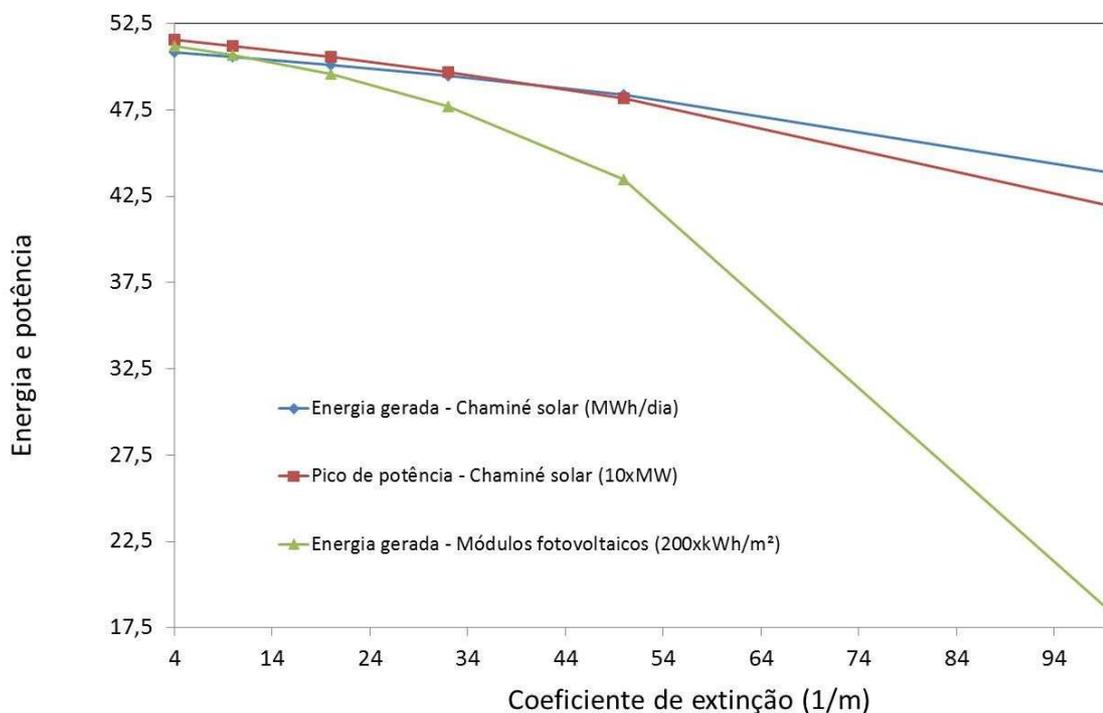


Figura 5.21: Influência do coeficiente de extinção

A Figura 5.21 mostra que a energia gerada e o pico de potência fornecidos pela chaminé solar sofrem uma redução quanto maior for o coeficiente de extinção do material vítreo, devido à redução na fração de radiação solar transmitida para o escoamento de ar abaixo do coletor. Porém, a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos sofre uma redução muito mais significativa, visto a dependência da radiação solar incidente ser muito maior para esta forma de captação de energia.

Ainda no quesito do material da cobertura, além das análises de sensibilidade realizadas, é realizada uma análise da influência de inserir ou não o elemento vítreo como uma resistência térmica de condução no modelo matemático já validado e discutido nos capítulos anteriores. A literatura como um todo desconsidera a influência da espessura deste elemento como resistência térmica, inserindo-a apenas nos cálculos da transmissividade do material vítreo. Para tanto, esta resistência térmica foi inserida no modelo e simulada para Manzanares e com os mesmos parâmetros já discutidos e mostrados na tabela 4.2.

Os resultados da comparação do modelo sem a resistência térmica de condução do vidro é confrontada com o modelo com a utilização desta resistência térmica, e podem ser observados na tabela 5.7.

Tabela 5.7 Influência do uso do vidro como resistência térmica de condução no modelo

<b>Parâmetro</b>	<b>Energia diária gerada (kWh)</b>	<b>Diferença Manzanares</b>
Não utilizando resistência térmica de condução do vidro	372,02	1,30%
Utilizando resistência térmica de condução do vidro	371,65	1,20%
Ganho percentual (aproximação) do uso deste modelo	0,10%	0,10%

Observa-se na tabela 5.7 que o uso de um modelo com resistência térmica de condução no vidro gera uma aproximação de 0,1% em relação aos dados experimentais. A redução na energia diária gerada pela chaminé solar promove um resultado mais realista e preciso, mas muito pouco se comparado ao aumento no tempo de processamento da simulação, que ficou em torno de 25% mais demorada.

A explicação para a redução na energia gerada mostrada na tabela 5.7 é simples: a cobertura vítrea absorve uma fração um pouco maior de calor, proporcionando elevação em sua temperatura, e menor quantidade de calor absorvido pelo fluxo de ar abaixo do coletor. Porém, apenas uma fração desta energia é perdida para o ambiente externo. A inércia térmica do sistema se altera um pouco, proporcionando um aquecimento residual do fluxo de ar pela temperatura maior do coletor para um período um pouco maior de tempo após cessar a radiação solar. O ganho de temperatura no coletor pode chegar a 1,5 °C, dependendo da região do coletor, e este acréscimo é convertido tanto em aumento da taxa de transferência de calor para fora do coletor quanto para o fluxo de ar abaixo do mesmo.

### 5.6.2 Análise da influência da localização dos módulos fotovoltaicos

As análises realizadas para a geração de energia utilizando módulos fotovoltaicos consideraram a sua localização na periferia, por ser uma região onde a temperatura do ar externo é a mais baixa. Porém, conforme se avança para o centro do coletor, a velocidade da corrente de ar tende a aumentar, e há um conseqüente aumento do coeficiente de convecção associado ao escoamento. Desta forma, uma análise foi conduzida para verificar a influência da localização dos módulos fotovoltaicos nesta geração de energia. Para tanto, foi realizada uma simulação envolvendo uma torre de 500 metros de altura, um coletor de 1000 m de

diâmetro e localizações de 10 em 10% do raio, para a cidade de Passo Fundo – RS, no verão. Os resultados desta simulação podem ser visualizados na Figura 5.22.

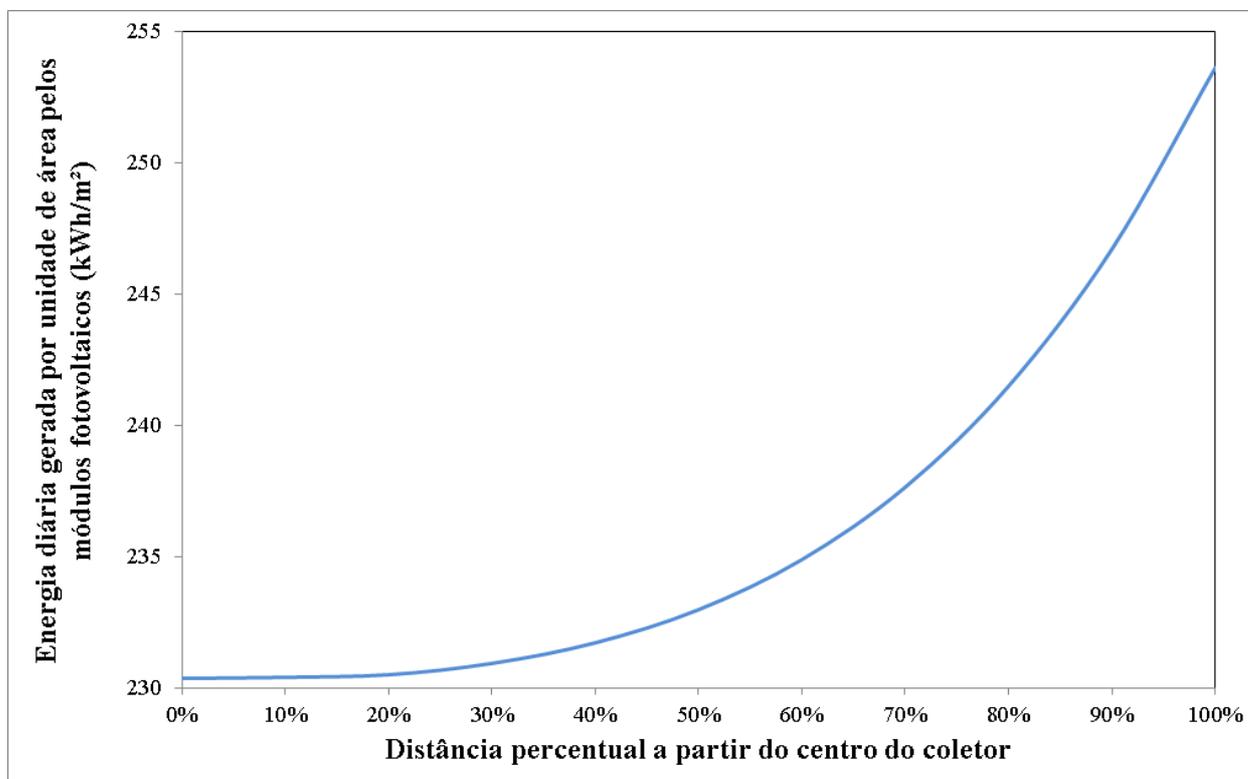


Figura 5.22: Influência da localização dos módulos na energia gerada

Percebe-se na Figura 5.22 que a instalação dos módulos mais próximos do centro do coletor acarreta em menor geração de energia, pois aumenta a temperatura dos módulos, reduzindo assim a eficiência dos mesmos. Esta redução na geração de energia dos módulos não é linear, pois o acréscimo da temperatura do ar, assim como o aumento da temperatura do mesmo quando este se desloca para o centro não são lineares.

## 5.7 CONCLUSÕES PARCIAIS

Falar de viabilidade técnica em usinas que não possuem uma geometria definida é complicado, pois a usina com pequena altura de chaminé e/ou pequeno coletor solar pode possuir um custo versus benefício desfavorável. Os mesmos resultados demonstram que para grandes dimensões, o investimento nesta tecnologia pode se tornar muito atraente, pois a energia gerada aumenta e, conforme referencial teórico, o custo de operação de uma usina deste tipo é reduzido. Como não há uma definição clara das dimensões, uma usina pode ser facilmente expandida através do aumento do coletor solar, após a chaminé ser construída. A

chaminé solar, por sua vez é o único elemento que não pode ser ampliado posteriormente por razões tecnológicas, salvo as usinas que operam com chaminés apoiadas em encostas de serras e regiões montanhosas, onde a saída da chaminé repousa sobre a encosta em local de fácil acesso.

Devido ainda ao fato de não existir uma geometria ótima, visto que quanto maior a usina maior a energia gerada, foram ajustadas superfícies de resposta para diversas localidades do Brasil, para prever o pico de potência, energia gerada pela chaminé solar e energia gerada pelo uso de módulos fotovoltaicos como fonte paralela, todas em função do diâmetro e altura da chaminé, tanto para o inverno quanto para o verão. Isto retorna segurança no dimensionamento para futuros empreendimentos deste tipo. Além destas superfícies, a influência da qualidade do material vítreo utilizado também foi estudada.

Para aumentar a produção de energia, foi estudada a utilização e melhor localização dos módulos fotovoltaicos para serem utilizados paralelamente aos geradores eólicos da chaminé solar. Foi verificado que a implantação destes na periferia da usina retorna maiores valores de energia produzida, visto a temperatura dos módulos serem menores nesta região.

Do ponto de vista energético, conforme relatório da EPE (Empresa de Pesquisa Energética do Brasil), o consumo médio per capita no Brasil é de 154 kWh/mês, o que representa uma média diária de aproximadamente 5 kWh/dia. Desta forma, as tabelas 5.8 e 5.9 mostram a quantidade de habitantes que poderiam ser beneficiados no inverno e no verão, respectivamente, para uma usina que possui uma chaminé de 500 m de altura e um coletor de 1000 m de diâmetro, para cada capital e para a cidade com maior incidência solar na estação.

Tabela 5.8 Habitantes beneficiados com usina padrão - inverno

<b>Região</b>	<b>UF</b>	<b>Cidade</b>	<b>Radiação solar (MJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Energia gerada Planta (MWh/dia)</b>	<b>Habitantes beneficiados</b>
Norte	AP	Macapá	16,40	44,49	8898
	AP	Oiapoque	15,60	43,65	8730
	AM	Coari	18,40	46,09	9218
	AM	Manaus	17,00	44,64	8928
	PA	Belém	18,20	45,99	9198
	PA	Marabá	19,30	47,13	9426
Norte	RO	Porto Velho	17,20	45,22	9044
	RO	Vilhena	16,00	43,96	8792
	RR	Boa Vista	14,40	42,19	8438
	TO	Palmas	20,20	48,69	9738
	TO	Tocantinópolis	18,70	47,09	9418

Nordeste	AL	Pão De Açúcar	14,20	42,48	8496
	AL	Maceió	14,10	42,38	8476
	BH	Salvador	15,00	44,03	8806
	BH	Santa Rita De Cássia	19,20	48,56	9712
	CE	Acaraú	18,60	47,14	9428
	CE	Fortaleza	18,20	46,71	9342
	MA	Caxias	19,00	47,10	9420
	MA	São Luiz	18,00	46,05	9210
	PB	Cajazeiras	18,70	47,59	9518
	PB	João Pessoa	15,40	44,07	8814
	PE	Fernando de Noronha	17,40	46,38	9276
	PE	Recife	13,70	42,45	8490
	PI	Teresina	19,00	46,88	9376
	PI	Uruçuí	19,70	47,61	9522
	RN	Cruzeta	17,10	45,29	9058
	RN	Natal	16,30	44,45	8890
	SE	Aracajú	15,10	43,39	8678
SE	Propriá	22,60	51,40	10280	
Centro Oeste	DF	Brasília	13,20	43,78	8756
	GO	Goiania	18,40	48,68	9736
	GO	Goiás	15,60	45,59	9118
	MG	Cuiabá	20,90	50,08	10016
	MG	Utiariti	18,20	47,15	9430
	MS	Campo Grande	12,00	40,82	8164
	MS	Corumbá	15,60	44,61	8922
Sudeste	ES	Conceição Da Barra	13,00	41,61	8322
	ES	Vitória	13,40	42,02	8404
	MG	Belo Horizonte	14,90	45,61	9122
	MG	Januária	16,60	47,51	9502
	RJ	Cabo Frio	13,80	43,61	8722
	RJ	Rio De Janeiro	11,60	41,26	8252
	SP	São Paulo	10,80	40,45	8090
Sul	PR	Curitiba	10,20	39,65	7930
	PR	Londrina	12,40	41,97	8394
	RS	Ijuí	11,60	44,73	8946
	RS	Porto Alegre	8,50	41,19	8238
	SC	Araranguá	12,80	44,96	8992
	SC	Florianópolis	9,90	41,70	8340

Tabela 5.9 Habitantes beneficiados com uma usina padrão - verão

Região	UF	Cidade	Radiação solar (MJ/m <sup>2</sup> )	Energia gerada Planta (MWh/dia)	Habitantes beneficiados
Norte	AP	Macapá	18,60	46,47	9294
	AP	Oiapoque	20,20	48,15	9630
	AM	Fonte Boa	18,90	46,20	9240
	AM	Manaus	17,20	44,45	8890
	PA	Belém	18,40	45,73	9146
	PA	Soure	21,00	48,44	9688
	RO	Porto Velho	15,20	42,47	8494
	RR	Boa Vista	18,10	45,29	9058
	TO	Palmas	18,90	46,34	9268
	TO	Taguatinga	19,70	47,17	9434
Nordeste	AL	Pão De Açúcar	20,70	47,68	9536
	AL	Maceió	22,00	49,03	9806
	BH	Salvador	21,90	49,40	9880
	BH	Santa Rita De Cássia	22,10	49,62	9924
	CE	Fortaleza	21,50	48,93	9786
	CE	Quixadá	22,00	49,46	9892
	MA	São Luiz	20,70	47,99	9598
	MA	Turialva	20,30	47,57	9514
	PB	João Pessoa	22,80	50,48	10096
	PB	São Gonçalo	22,80	50,48	10096
	PE	Barreiros	23,90	51,48	10296
	PE	Recife	19,70	47,06	9412
	PI	Paulistana	20,70	48,04	9608
	PI	Teresina	19,40	46,69	9338
	RN	Natal	23,00	50,03	10006
	RN	Santa Cruz (Rn)	22,40	49,40	9880
SE	Aracajú	23,30	50,26	10052	
SE	Propriá	22,60	49,53	9906	
Centro Oeste	DF	Brasília	16,40	44,97	8994
	GO	Goiás	18,40	46,28	9256
	GO	Mineiros	21,00	49,02	9804
	MG	Coxipó Da Ponte	19,10	46,39	9278
	MG	Cuiabá	23,90	51,43	10286
	MS	Campo Grande	19,40	46,85	9370
	MS	Fazenda Rio Negro	23,20	50,86	10172
	Sudeste	ES	Conceição Da Barra	20,00	47,57
ES		Vitória	19,60	47,15	9430
MG		Belo Horizonte	18,40	46,24	9248
MG		Ouro Fino	21,90	49,93	9986
RJ		Cabo Frio	21,30	48,71	9742
RJ		Rio De Janeiro	20,20	47,56	9512
SP		Monte Alegre Do Sul	22,60	51,10	10220
SP		São Paulo	17,60	45,75	9150

---

	PR	Curitiba	19,70	47,77	9554
	PR	Toledo	23,00	51,30	10260
Sul	RS	Passo Fundo	26,40	54,36	10872
	RS	Porto Alegre	23,30	51,02	10204
	SC	Curitibanos	24,30	52,74	10548
	SC	Florianópolis	20,60	48,75	9750

---

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como foco principal a confecção de um modelo matemático e numérico para avaliar tecnicamente o potencial energético de chaminés solares no Brasil e do uso paralelo de módulos fotovoltaicos para melhorar esta geração de energia, avaliando, ainda, a sensibilidade de fatores como qualidade do material vítreo e disposição dos módulos fotovoltaicos nas variáveis de saída de energia.

O Brasil é um país rico em energia solar, principalmente nas regiões centro-oeste, norte e nordeste, e, conforme dados apresentados, inclusive no extremo sul do país há abundância deste recurso em estações do ano mais quentes. Com estes parâmetros de incidência solar e outros dados climáticos, foi possível iniciar a confecção do código computacional para prever o potencial energético do Brasil.

Os modelos matemático e computacional foram validados com base no protótipo experimental de Manzanares, gerando resultados muito satisfatórios, com margem de erro de apenas 1,3%. Isto agrega confiabilidade ao modelo computacional utilizado, podendo servir como base para futuros empreendimentos desta tecnologia em quaisquer regiões do País. O modelo matemático proposto considera um diferencial em relação aos demais propostos pela literatura, no que concerne a transferência de calor radiativa na cobertura vítrea, pois levam em conta os efeitos das múltiplas reflexões no material vítreo e ainda na interface entre o coletor e o solo, fenômeno este que não é considerado nos demais trabalhos.

Sabe-se que correlações de transferência de calor carregam uma imprecisão grande, na ordem de 10 a 30% em relação a resultados reais, e que a instrumentação de plantas com instrumentos como anemômetros, fluxímetros e termopares também possuem uma faixa de precisão, erros de leitura e outros fatores. Desta forma, a precisão nos resultados obtidos por Bernardes *et al.* (2003) e os resultados obtidos por este trabalho podem ser questionadas e devem, em trabalhos futuros, ser investigadas. Os fatores que podem ter influenciado nas pequenas divergências entre os dados experimentais e os resultados deste trabalho incluem as propriedades do solo (utilizadas baseadas no trabalho de Bernardes *et al.*, 2003) e um fator de ordem de grandeza, ou seja, alguns coeficientes de transferência de calor, por mais díspares que possam ficar da realidade, influenciam muito pouco a energia de saída.

Desta forma, este trabalho vem a ser um guia que conta com a apresentação de um modelo matemático fiel para estudar este tipo de tecnologia, apresenta dados para o

dimensionamento de usinas operando por este princípio e ainda com o auxílio de uma planta paralela para a geração combinada por módulos fotovoltaicos.

Apesar desta tecnologia ainda possuir barreiras econômicas e ser inviável economicamente em muitos países, visto as energias renováveis apresentarem custos relativamente altos de implantação, esta é uma tecnologia que suporta vários anos de operação a um custo operacional muito baixo, e já há notícias de projetos a serem executados em curto prazo, podendo beneficiar milhares de pessoas com energia limpa e renovável.

As principais contribuições deste trabalho em vista da literatura existente são enumeradas a seguir.

1. Fornece uma nova abordagem matemática par o tratamento de chaminés solares, que inclui o efeito de múltiplas reflexões da radiação solar no material vítreo e na interface entre o coletor e o solo;
2. Valida este modelo com base nos dados experimentais obtidos em Manzanares, Espanha e fornecidos por Weinrebe (2010) através de um código computacional confeccionado em C++, obtendo um erro de 1,3%, considerado um excelente ajuste;
3. Estuda e fornece dados de potencial energético de chaminés solares atuando isoladamente e com o uso combinado com módulos fotovoltaicos, para o Brasil para uma geometria predefinida, para o inverno, verão e para uma média anual;
4. Analisa a influência de parâmetros geométricos (diâmetro do coletor e altura da chaminé) na geração de energia para 50 cidades brasileiras com maior incidência de radiação solar, tanto no inverno como no verão;
5. Analisa a influência de parâmetros ópticos (qualidade do material vítreo do coletor) na geração de energia;
6. Valida a hipótese adotada pela literatura de não modelar a resistência térmica de condução do vidro, por impactar minimamente no resultado final;
7. Realiza uma análise de sensibilidade sobre o efeito da localização dos módulos fotovoltaicos na geração de energia combinada;
8. É o primeiro trabalho a realizar uma análise de potencial desta tecnologia para o Brasil.

Algumas considerações sobre este trabalho:

1. As análises consideram céu limpo (ausência de nuvens) ;
2. O atlas solarimétrico utilizado não retorna o percentual de cobertura por nuvens;
3. As análises foram executadas por sete vezes seguidas para cada cidade para eliminar ruídos das estimativas iniciais de velocidade e temperatura das superfícies;
4. Apesar de possuir uma baixa eficiência ( $\sim 1,6\%$  para  $H = 1000$  m), esta tecnologia possui baixo custo operacional, além de baixa emissão de CO<sub>2</sub> na produção de seus componentes, comparativamente com outras energias limpas;
5. Possui uma vida útil elevada ( $>60$  anos).

Como sugestões para trabalhos futuros destacam-se algumas: (a) o estudo da viabilidade de extração de água do ar combinada com a geração de energia elétrica, conforme proposto por Kashiva e Kashiva (2008); (b) estudo de dispositivo para extração de água do ar atmosférico por meio mecânico; (c) estudo detalhado de viabilidade econômica de chaminés solares em solo brasileiro, para comparar a implantação desta tecnologia com outras fontes renováveis e limpas; (d) Confecção de software de energias renováveis explorando várias tecnologias para o mapeamento do potencial energético brasileiro; (e) estudo de ordem de grandeza para verificar a sensibilidade da energia gerada em função de correlações de coeficientes de transferência de calor.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALTMANN, T.; CARMEL, Y.; GUETTA, R.; ZASLAVSKY, D.; DOYTSHER, Y. Assessment of an “Energy Tower” potential in Australia using a mathematical model and GIS. **Solar Energy**, Volume 78, 799-808, 2005.

ALVESTA ENERGY. [http://www.alvestaenergy.com/images/wind-turbines-next\\_clip\\_image002.gif](http://www.alvestaenergy.com/images/wind-turbines-next_clip_image002.gif). Visualizado na data 27 de Fevereiro de 2010.

ANEEL. [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/energia\\_eolica/images/fig6\\_1.jpg](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/energia_eolica/images/fig6_1.jpg). Visualizado em 27 de Fevereiro de 2010.

ASHRAE. 1997 ASHRAE Handbook – Fundamentals. Capítulo 6 – Psychrometrics. 1997.

BAEHR, H.D.; STEPHAN, K. Wärme und Stoffübertragung, **Springer-Verlag**, Berlin, 1996.

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

BENNET, K.D. Milankovitch cycles and their effects on species in ecological and evolutionary time. **Journal of Paleobiology**, Volume 16, 11-21, 1990.

BERDAHL, P.; MARTIN, M. Emissivity of clear skies. **Solar Energy**, Volume 32, 663-664, 1984.

BERNARDES, M. A. S. Solar Chimney Power Plants – Developments and Advancements. **Solar Energy**, ISBN: 978-953-307-052-0, 2010. Disponível em <http://sciyo.com/articles/show/title/solar-chimney-power-plants-developments-and-advancements>.

BERNARDES, M. A. S.; WEINREBE, G.; VOB, A. Thermal and technical analyses of solar chimneys. **Solar Energy**, Volume 75, 511-524, 2003.

- BERNARDES, Marco Aurélio dos Santos; VON BACKSTRÖM, Theodor W.; KRÖGER, Detlev G. Analysis of some available heat transfer coefficients applicable to solar chimney power plant collectors. **Solar Energy**, Volume 83, 264-275, 2009.
- BILGEN, E.; RHEAULT, J. Solar chimney power plants for high latitudes. **Solar Energy**, Volume 79, 449-458, 2005.
- BOBEK, A. Estudo tecno-econômico para a implantação de uma chaminé solar no norte do Brasil. **Monografia**. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2010.
- CABANYES, Isidoro. Proyecto de motor solar. **La energia Eléctrica – Revista General de Electricidad y sus Aplicaciones**. Vol 8, 61-65, 1903.
- CAO, F.; ZHAO, L.; GUO, L. Simulation of a sloped solar chimney power plant in Lanzhou. **Energy Conversion and Management**, Volume 52, 2360-2366, 2011.
- CDCC – USP. <http://fisica.cdcc.sc.usp.br/olimpiadas/01/artigo1/energiamares.jpg>. Visualizado na data 26 de Fevereiro de 2010.
- CHEN, R. Y. Flow in The Entrance Region at Low Reynolds Numbers. *Journal of Fluids Engineering*. Vol 95, 153-158, 1973.
- CHINA ENERGY SECTOR. <http://chinaenergysector.com/2010/12/20/>. Visualizado na data 12 de Outubro de 2009.
- CLEAN TECHNICA. <http://cleantechnica.com/2009/04/20/>. Visualizado na data 12 de Outubro de 2009.
- CLOETE, R. (25 de julho de 2008) Engineering News Online. Visualizado em [http://www.engineeringnews.co.za/article.php?a\\_id=137580](http://www.engineeringnews.co.za/article.php?a_id=137580) na data 14 de julho de 2010.
- Comissão de Energia da Califórnia. A guide to photovoltaic (PV) system design and installation, Califórnia, 2001.
- DENANTES, F.; BILGEN, E. Counter-rotating turbines for solar chimney power plants. **Renewable Energy**, Volume 31, 1873-1891, 2006.

DIENSTMANN, G. Energia solar: uma comparação de tecnologias. **Monografia**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

DONAUER SOLAR SYSTEMS. Catálogo eletrônico disponível em <http://www.donauer.eu/pt/solar-fotovoltaico/produtos/paineis-solares.html> visualizado em 20 de julho de 2010.

DROLLETTE, D. Energy from the motion of the ocean, 2006. Visualizado em [http://money.cnn.com/2006/12/14/magazines/fsb/nextlittlething\\_wave\\_power.fsb/index.htm](http://money.cnn.com/2006/12/14/magazines/fsb/nextlittlething_wave_power.fsb/index.htm) na data 11 de Outubro de 2009.

ELETRONUCLEAR. <http://eletronuclear.gov.br/tecnologia/index.php>. Visualizado em 01 de Abril de 2012.

ELIOTH. Montagne Solaire, 2010. Visualizado em <http://www.elioth.com> na data 30 de novembro de 2010.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética do Brasil. Análise do sistema de integração dos aproveitamentos hidrelétricos da bacia do rio Teles Pires e reforços no SIN. Relatório técnico n° EPE-DEE-RE-050/2011-r1, 2011.

FERREIRA, A. G.; MAIA, C. B.; CORTEZ, M. F. B.; VALLE, R. M. Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying. **Solar Energy**, Volume 82, 198-205, 2008.

FERREIRA, André G.; MAIA, Cristiana B.; Valle, Ramón M.; CORTEZ, Márcio F. B. Balanço energético de uma chaminé solar. **RECIE**, Volume 15, n.1/2, 37-43, 2006.

FLURI, T. P.; PRETORIUS, J. P.; VAN DYK, C.; VON BACKSTRÖM, T. W.; KRÖGER, D. G.; VAN ZIJL, G. P. A. G. Cost analysis of solar chimney power plants. **Solar Energy**, Volume 83, 246-256, 2009.

FLURI, T. P.; VON BACKSTRÖM, T. W. Comparison of modelling approaches and layouts for solar chimney turbines. **Solar Energy**, Volume 82, 239-246, 2008.

FLURI, T. P.; VON BACKSTRÖM, T. W. Maximum fluid power condition in solar chimney power plants – Na analytical approach. **Solar Energy**, Volume 80, 1417-1423, 2006.

FLURI, T. P.; VON BACKSTRÖM, T. W. Performance analysis of the power conversion unit of a solar chimney power plant. **Solar Energy**, Volume 82, 999-1008, 2008.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Rio de Janeiro: 4ª Edição, Editora LTC, 1995.

GANNON, A. J.; BACKSTROM, T. W. V. Solar chimney cycle analysis with system loss and solar collector performance. **Journal of solar energy engineering**. Vol 122, 133-137, 2000.

GNIELINSKI, V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. **International chemical engineering**. Vol 16, 359-368, 1976.

GRAY, D.D.; GIORGINI, A.; The Validity of Boussinesq Approximation for Liquids and Gases. **International Journal of Heat Mass Transfer**, vol. 19, pp 545-551, 1976.

GREEN DOLLARS AND SENSE. <http://greendollarsandsense.files.wordpress.com>  
Visualizado na data 12 de Outubro de 2009.

Grupo de Pesquisa em Fontes Alternativas de Energia. Atlas Solarimétrico do Brasil. Universidade Federal de Pernambuco. CD-ROM. ISBN 85-7315-188-9 (2003)

GÜNTER, H. In hundert Jahren. **Kosmos – Gesellschaft der Naturfreunde**. 78pp Stuttgart, 1931

HAAF, W. Solar chimneys. Part 2: Preliminary test results from the Manzanares pilot plant. **International Journal of Solar Energy**, Volume 2, 141-161, 1984.

HAAF, W.; FRIEDERICH, K.; MAYR, G.; SCHLAICH, J. Solar chimneys. Part 1: Principle and construction of the pilot plant in Manzanares. **International Journal of Solar Energy**, Volume 2, 3-20, 1983.

HAMDAN, M.O. Analysis of a solar chimney power plant in the Arabian Gulf region. **Renewable Energy**, Volume 36, 2593-2598, 2011.

HEDDERWICK, R.A. Performance evaluation of a solar chimney power plant. Department of mechanical engineering. University of Stellenbosch. Master dissertation, South Africa, 2001.

HOOGWIJK, M.; GRAUS, W. Global potential of renewable energy sources: a literature assessment. **Ecofys**, PECSNL072975, 2008.

How Stuff Works. <http://static.hsw.com.br/gif/hydropower-plant-parts.gif>. Visualizado na data 27 de Fevereiro de 2010.

How Stuff Works<sup>2</sup>. <http://ambiente.hsw.uol.com.br/energia-das-ondas2.htm>. Visualizado na data 27 de fevereiro de 2010.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: 4ª Edição, Editora LTC, 1998.

JACKSON, J. D. Review of Climate Change Causality. **IWMC World Conservation Trust**, 2007.

JESUS, M.F.; SILVA, G.F. Programa para estimativa das propriedades psicrométricas. **Revista brasileira de produtos agroindustriais**, Volume e, 63-70, 2002.

KASHIWA, B. A.; KASHIWA, C. B. The solar cyclone: A solar chimney for harvesting atmospheric water. **Energy**, Volume 33, 331-339, 2008.

KETLOGETSWE, C.; FISZDON, J. K.; SEABE, O. O. Solar chimney power generation Project – the case for Botswana. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, Volume 12, 2005-2012, 2008.

KOONSRIKUK, A.; CHITSOMBOON, T. Dynamic similarity in solar chimney modeling. **Solar Energy**, Volume 81, 1439-1446, 2007.

LNEG. <http://www.lneg.pt/iedt/projectos/313/resultados>. Visualizado em 01 de Abril de 2012.

MAYER, H.; APPEL, E. Milankovitch cyclicity and rock-magnetic signatures of palaeoclimatic change in the early cretaceous biancone formation of the Southern alps, Italy. **Cretaceous Research**, Volume 20, 189-214, 1999.

METEOROLOGICAL REACTORS. <http://www.solar-tower.org.uk/>. Visualizado em 01 de Abril de 2012.

MUÑOZ-LACUNA, J. V. (13 de fevereiro de 2006) Visualizado em *lasprovincias.es* <http://www.lasprovincias.es/valencia/pg060213/prensa/noticias/Espana/200602/13/AL-ESP-051.html> na data 14 de julho de 2010.

NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL. “**Plugados no Sol**”. Páginas 76-95, Edição Setembro de 2009.

NFRC, National Fenestration Rating Council, Procedure for determining fenestration product U-Factors. Silver Spring, MD, 2001.

NINIC, N. Available energy of the air in solar chimneys and the possibility of its ground-level concentration. **Solar Energy**, Volume 80, 804-811, 2005.

NINIC, N.; NIZETIC, S. Elementary theory of stationary vortex columns for solar chimney power plants. **Solar Energy**, Volume 83, 462-476, 2009.

NIZETIC, S.; KLARIN, B. A simplified analytical approach for evaluation of the optimal ratio pressure drop across the turbine in solar chimney power plants. **Applied Energy**, Article in press, 5 pages, 2009.

NIZETIC, S.; NINIC, N.; KLARIN, B. Analysis and feasibility of implementing solar chimney power plants in the Mediterranean region. **Energy**, Volume 33, 1680-1690, 2008.

ONYANGO, F. N.; OCHIENG, R. M. The potential of solar chimney for application in rural areas of developing countries. **Fuel**, Volume 85, 2561-2566, 2006.

PANSE, S.V.; JADHAV, A.S.; GUDEKAR, A.S.; JOSHI, J.B. Inclined solar chimney for power production. **Energy Conversion and Management**, Volume 52, 3096-3102, 2011.

PETELA, R. Thermodynamic study of a simplified model of the solar chimney power plant. **Solar Energy**, Volume 83, 94-107, 2009.

PETIT, J. R., *et al.* Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. **Nature**, Vol. 399, pp. 429-436, 1999.

PRETORIUS, J. P.; KRÖGER, D. G. Critical evaluation of solar chimney power plant performance. **Solar Energy**, Volume 80, 535-544, 2006.

ROURKE, F.O.; BOYLE, F.; REYNOLDS, A. Tidal energy update 2009. **Applied Energy**, Volume 87, 398-409, 2010.

SANGI, R. Performance evaluation of solar chimney power plants in Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Article in Press, 2011.

SANTOS, G.H.; Transferência tridimensional acoplada de calor e umidade em solos sob edificações. **Dissertação de Mestrado**. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2003.

SARDEIRO, P. S. Parâmetros para a escolha de superfícies translúcidas visando o conforto térmico e visual na edificação. Tese de Doutorado. Unicamp, Campinas, 2007.

SCHLAICH, J. **The solar chimney**. Edition Axel Menges, Stuttgart, 1995.

SCHLAICH, J.; MAYR, G.; FRIEDRICH, K.; HAAF, W. Solar chimneys. Part 1: Principle and construction of the pilot plant in Manzanares. **International Journal of Solar Energy**, Volume 2, 3-20, 1983.

SCHLICHTING, H. **Boundary layer theory**. 8ª Edição, Ed. Springer, 2004

SHAPIRO, H. N.; MORAN, M. J. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. Rio de Janeiro: 4ª Edição, Editora LTC, 2002.

SHORT, D.A.; MENGEL, J.G.; CROWLEY, T.J.; HYDE, W.T., NORTH, G.R. Filtering of Milankovitch cycles by earth's geography. **Quaternary Research**, Volume 35, 157-173, 1991.

SIMMONS, G. F.; **Cálculo com geometria analítica**. Makron Books, 1988.

SINCLAIR. <http://www.sinclairmfg.com/datasheets/optical3.html>. Visualizado em 01 de Abril de 2012.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J.A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. **Solar Energy**, Volume 83, 614-624, 2009.

SQUIDDO. <http://www.squidoo.com/solarchimney>. Visualizado em 01 de Abril de 2012.

STOECKER, W.F. ; JONES, J.W.; Refrigeração e ar condicionado. Editora MCGraw-Hill, São Paulo, 1985.

STROBEL, C. S. Transferência de Calor Conduitiva e Radiativa em Sistemas Vítreos Planos e Compostos. **Dissertação de Mestrado**. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2007.

TINGZHEN, M.; WEI, L.; GUOLING, X.; YANBIN, X.; XUHU, G.; YUAN, P. Numerical simulation of the solar chimney power plant systems coupled with turbine. **Renewable Energy**, Volume 33, 897-905, 2008.

VON BACKSTRÖM, T. W.; KIRSTEIN, C. F.; PILLAY, L. A. The influence of some secondary effects on solar chimney power plant performance. **R&D Journal**, Volume 22, 5-10, 2006.

VON BACKSTRÖM, T. W.; GANNON, A.J. Solar chimney turbine characteristics. **Solar Energy**, Volume 76, 235-241, 2004.

WEINREBE, G. Carta pessoal para o autor. Schlaich Bergermann Solar GmbH. Stuttgart, Alemanha, recebida em 01 de dezembro de 2010.

WHITE, F.M. **Viscous fluid flow**. Mc-Graw Hill, New York, 1974.

XU, G.; MING, T.; PAN, Y.; MENG, F.; ZHOU, C. Numerical analysis on the performance of solar chimney power plant system. **Energy Conversion and Management**, Volume 52, 876-883, 2011.

ZHOU, Xinping; YANG, Jiakuan; XIAO, Bo; HOU, Guoxiang. Experimental study of temperature field in solar chimney power setup. **Applied Thermal Engineering**, Volume 27, 2044-2050, 2007.

ZHOU, Xinping; YANG, Jiakuan; XIAO, Bo; HOU, Guoxiang; XING, Fang. Analysis of chimney height for solar chimney power plant. **Applied Thermal Engineering**, Volume 29, 178-185, 2009.

## APÊNDICE A – RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO BIDIMENSIONAL PARA O INVERNO

Tabela A.1 Coeficientes obtidos para a equação ajustada para a energia gerada – inverno

Região	UF	Cidade	Z <sub>0</sub>	a	b	c	d	f	R <sup>2</sup>	Chi <sup>2</sup>
Norte	AP	Macapá	12,37	-4,28E-02	-5,20E-02	2,68E-05	4,66E-05	1,00E-04	0,98661	0,60962
	AP	Oiapoque	12,20	-4,23E-02	-5,11E-02	2,65E-05	4,58E-05	1,14E-04	0,98648	0,59692
	AM	Coari	12,64	-4,36E-02	-5,33E-02	2,71E-05	4,81E-05	1,19E-04	0,98696	0,62719
	AM	Manaus	12,35	-4,27E-02	-5,19E-02	2,67E-05	4,67E-05	1,15E-04	0,98673	0,60499
	PA	Belém	12,63	-4,35E-02	-5,32E-02	2,71E-05	4,80E-05	1,18E-04	0,98692	0,62716
	PA	Marabá	12,86	-4,42E-02	-5,43E-02	2,75E-05	4,91E-05	1,21E-04	0,98709	0,64493
	RO	Porto Velho	12,51	-4,32E-02	-5,26E-02	2,70E-05	4,73E-05	1,17E-04	0,98675	0,61949
	RO	Vilhena	12,26	-4,24E-02	-5,14E-02	2,66E-05	4,61E-05	1,14E-04	0,98655	0,60034
	RR	Boa Vista	11,89	-4,13E-02	-4,96E-02	2,60E-05	4,44E-05	1,10E-04	0,98628	0,57167
	TO	Palmas	12,86	-4,43E-02	-5,42E-02	2,76E-05	4,89E-05	1,21E-04	0,98694	0,64973
	TO	Tocantinópolis	12,90	-4,45E-02	-5,44E-02	2,77E-05	4,91E-05	1,21E-04	0,98697	0,6532
Nordeste	AL	Pão De Açúcar	12,00	-4,17E-02	-5,01E-02	2,63E-05	4,47E-05	1,11E-04	0,98621	0,58427
	AL	Maceió	11,98	-4,16E-02	-5,00E-02	2,63E-05	4,46E-05	1,11E-04	0,98619	0,58271
	BH	Salvador	12,39	-4,30E-02	-5,17E-02	2,71E-05	4,63E-05	1,15E-04	0,98632	0,61916
	BH	Santa Rita De Cássia	13,28	-4,57E-02	-5,60E-02	2,84E-05	5,06E-05	1,25E-04	0,98701	0,69068
	CE	Acaráú	12,93	-4,46E-02	-5,45E-02	2,77E-05	4,92E-05	1,21E-04	0,98695	0,65638
	CE	Fortaleza	12,85	-4,43E-02	-5,41E-02	2,76E-05	4,88E-05	1,20E-04	0,98689	0,64968
	MA	Caxias	12,88	-4,43E-02	-5,43E-02	2,76E-05	4,91E-05	1,21E-04	0,98703	0,64873
	MA	São Luiz	12,67	-4,37E-02	-5,33E-02	2,72E-05	4,81E-05	1,19E-04	0,98687	0,6324
	PB	Cajazeiras	13,05	-4,50E-02	-5,50E-02	2,80E-05	4,96E-05	1,22E-04	0,98695	0,66849
	PB	João Pessoa	12,35	-4,28E-02	-5,17E-02	2,69E-05	4,63E-05	1,15E-04	0,98641	0,61348
	PE	Fernando de Noronha	12,83	-4,43E-02	-5,39E-02	2,77E-05	4,85E-05	1,20E-04	0,98674	0,65228
	PE	Recife	12,05	-4,19E-02	-5,02E-02	2,65E-05	4,47E-05	1,12E-04	0,98609	0,59143

Nordeste	PI Teresina	12,81	-4,41E-02	-5,41E-02	2,74E-05	4,89E-05	1,20E-04	0,98704	0,6419
	PI Uruçuí	12,96	-4,46E-02	-5,47E-02	2,76E-05	4,96E-05	1,22E-04	0,98714	0,65334
	RN Cruzeta	12,54	-4,33E-02	-5,27E-02	2,71E-05	4,74E-05	1,17E-04	0,98672	0,62344
	RN Natal	12,37	-4,28E-02	-5,19E-02	2,68E-05	4,66E-05	1,15E-04	0,98659	0,61058
	SE Aracajú	12,18	-4,22E-02	-5,09E-02	2,66E-05	4,56E-05	1,13E-04	0,98637	0,59743
	SE Propriá	13,76	-4,71E-02	-5,85E-02	2,90E-05	5,33E-05	1,30E-04	0,98754	0,72331
	DF Brasília	12,50	-4,35E-02	-5,20E-02	2,76E-05	4,62E-05	1,16E-04	0,98594	0,64041
	GO Goiânia	13,40	-4,62E-02	-5,64E-02	2,88E-05	5,08E-05	1,25E-04	0,98686	0,70722
	GO Goiás	12,78	-4,43E-02	-5,35E-02	2,79E-05	4,79E-05	1,19E-04	0,98639	0,65741
	MG Cuiabá	13,55	-4,65E-02	-5,74E-02	2,88E-05	5,21E-05	1,28E-04	0,98728	0,71044
Centro Oeste	MG Utiariti	12,98	-4,48E-02	-5,46E-02	2,79E-05	4,92E-05	1,22E-04	0,98687	0,66357
	MS Campo Grande	11,74	-4,09E-02	-4,87E-02	2,60E-05	4,32E-05	1,08E-04	0,98576	0,56932
	MS Corumbá	12,50	-4,33E-02	-5,23E-02	2,72E-05	4,68E-05	1,16E-04	0,98642	0,62734
	ES Conceição Da Barra	11,87	-4,13E-02	-4,93E-02	2,62E-05	4,39E-05	1,10E-04	0,98597	0,57675
	ES Vitória	11,95	-4,16E-02	-4,97E-02	2,63E-05	4,43E-05	1,11E-04	0,98604	0,58300
	MG Belo Horizonte	12,86	-4,46E-02	-5,37E-02	2,81E-05	4,80E-05	1,19E-04	0,98625	0,66971
	MG Januária	13,24	-4,58E-02	-5,55E-02	2,87E-05	4,98E-05	1,23E-04	0,98655	0,70068
	RJ Cabo Frio	12,39	-4,31E-02	-5,16E-02	2,72E-05	4,59E-05	1,15E-04	0,98607	0,62583
	RJ Rio De Janeiro	11,92	-4,16E-02	-4,93E-02	2,65E-05	4,37E-05	1,10E-04	0,98564	0,58935
	SP Pradópolis	12,75	-4,42E-02	-5,33E-02	2,78E-05	4,77E-05	1,19E-04	0,98636	0,65487
Sudeste	SP São Paulo	11,76	-4,11E-02	-4,86E-02	2,63E-05	4,29E-05	1,08E-04	0,98547	0,57783
	PR Curitiba	11,58	-4,05E-02	-4,78E-02	2,59E-05	4,21E-05	1,06E-04	0,98536	0,56306
	PR Londrina	12,05	-4,20E-02	-5,00E-02	2,67E-05	4,44E-05	1,11E-04	0,9858	0,59849
	RS Ijuí	12,95	-4,52E-02	-5,36E-02	2,88E-05	4,74E-05	1,19E-04	0,98559	0,69684
	RS Porto Alegre	12,23	-4,30E-02	-5,02E-02	2,77E-05	4,40E-05	1,12E-04	0,98492	0,63849
	SC Araranguá	12,89	-4,49E-02	-5,35E-02	2,85E-05	4,75E-05	1,19E-04	0,98584	0,68375
	SC Florianópolis	12,23	-4,29E-02	-5,04E-02	2,75E-05	4,43E-05	1,12E-04	0,98524	0,63087

Tabela A.2 Coeficientes obtidos para a equação ajustada para o pico de potência – inverno

Região	UF	Cidade	Z <sub>0</sub>	a	b	c	d	f	R <sup>2</sup>	Chi <sup>2</sup>
Norte	AP	Macapá	1088,92	-3,68	-4,71	2,21E-03	4,37E-03	1,05E-02	0,98869	4,28E+03
	AP	Oiapoque	1066,62	-3,61	-4,60	2,17E-03	4,26E-03	1,02E-02	0,98855	4,14E+03
	AM	Coari	1131,19	-3,80	-4,92	2,26E-03	4,59E-03	1,10E-02	0,98904	4,54E+03
	AM	Manaus	1092,50	-3,68	-4,73	2,20E-03	4,40E-03	1,05E-02	0,98881	4,28E+03
	PA	Belém	1128,32	-3,80	-4,91	2,26E-03	4,57E-03	1,09E-02	0,98901	4,52E+03
	PA	Marabá	1158,76	-3,89	-5,05	2,31E-03	4,73E-03	1,12E-02	0,98918	4,72E+03
	RO	Porto Velho	1108,34	-3,74	-4,80	2,23E-03	4,47E-03	1,07E-02	0,98883	4,40E+03
	RO	Vilhena	1074,78	-3,63	-4,64	2,18E-03	4,30E-03	1,03E-02	0,98862	4,19E+03
	RR	Boa Vista	1027,22	-3,48	-4,42	2,11E-03	4,07E-03	9,83E-03	0,98833	3,88E+03
	TO	Palmas	1152,09	-3,87	-5,01	2,30E-03	4,68E-03	1,12E-02	0,98904	4,70E+03
TO	Tocantinópolis	1158,15	-3,89	-5,04	2,31E-03	4,71E-03	1,12E-02	0,98907	4,75E+03	
Nordeste	AL	Pão De Açúcar	1035,36	-3,52	-4,45	2,13E-03	4,10E-03	9,90E-03	0,98827	3,95E+03
	AL	Maceió	1032,51	-3,51	-4,43	2,13E-03	4,08E-03	9,87E-03	0,98825	3,94E+03
	BH	Salvador	1075,53	-3,65	-4,63	2,20E-03	4,28E-03	1,03E-02	0,98841	4,24E+03
	BH	Santa Rita De Cássia	1196,25	-4,02	-5,21	2,38E-03	4,87E-03	1,16E-02	0,98914	5,05E+03
	CE	Acarauá	1159,47	-3,90	-5,04	2,32E-03	4,71E-03	1,12E-02	0,98905	4,76E+03
	CE	Fortaleza	1148,00	-3,86	-4,99	2,30E-03	4,65E-03	1,11E-02	0,98899	4,68E+03
	MA	Caxias	1157,88	-3,89	-5,04	2,31E-03	4,71E-03	1,12E-02	0,98913	4,73E+03
	MA	São Luiz	1129,95	-3,80	-4,91	2,27E-03	4,58E-03	1,09E-02	0,98897	4,54E+03
	PB	Cajazeiras	1171,86	-3,94	-5,10	2,34E-03	4,76E-03	1,13E-02	0,98906	4,86E+03
	PB	João Pessoa	1077,88	-3,65	-4,65	2,20E-03	4,30E-03	1,03E-02	0,98849	4,24E+03
	PE	Fernando de Noronha	1139,30	-3,84	-4,94	2,30E-03	4,59E-03	1,10E-02	0,98885	4,65E+03
	PE	Recife	1034,20	-3,52	-4,44	2,14E-03	4,08E-03	9,87E-03	0,98815	3,97E+03
	PI	Teresina	1151,76	-3,87	-5,02	2,30E-03	4,69E-03	1,12E-02	0,98913	4,68E+03
	PI	Uruçuí	1171,15	-3,93	-5,11	2,32E-03	4,79E-03	1,14E-02	0,98924	4,81E+03

Nordeste	RN	Cruzeta	1110,25	-3,74	-4,81	2,24E-03	4,47E-03	1,07E-02	0,98881	4,42E+03
	RN	Natal	1087,86	-3,68	-4,70	2,21E-03	4,36E-03	1,05E-02	0,98867	4,28E+03
	SE	Aracajú	1059,66	-3,59	-4,57	2,17E-03	4,22E-03	1,02E-02	0,98845	4,11E+03
	SE	Propriá	1272,54	-4,25	-5,59	2,49E-03	5,27E-03	1,24E-02	0,98963	5,56E+03
Centro Oeste	DF	Brasília	1068,16	-3,64	-4,57	2,22E-03	4,19E-03	1,02E-02	0,98801	4,26E+03
	GO	Goiania	1199,02	-4,03	-5,21	2,40E-03	4,86E-03	1,16E-02	0,98899	5,11E+03
	GO	Goiás	1116,67	-3,78	-4,82	2,28E-03	4,45E-03	1,07E-02	0,98850	4,55E+03
	MG	Cuiabá	1236,64	-4,14	-5,41	2,44E-03	5,08E-03	1,20E-02	0,98939	5,32E+03
	MG	Utiariti	1159,16	-3,90	-5,04	2,32E-03	4,70E-03	1,12E-02	0,98898	4,78E+03
	MS	Campo Grande	990,16	-3,38	-4,22	2,07E-03	3,86E-03	9,39E-03	0,98778	3,70E+03
Sudeste	MS	Corumbá	1091,88	-3,70	-4,71	2,23E-03	4,36E-03	1,05E-02	0,98852	4,34E+03
	ES	Conceição Da Barra	1011,73	-3,45	-4,33	2,10E-03	3,97E-03	9,63E-03	0,98801	3,82E+03
	ES	Vitória	1022,84	-3,48	-4,38	2,12E-03	4,03E-03	9,75E-03	0,98809	3,89E+03
	MG	Belo Horizonte	1115,33	-3,78	-4,80	2,29E-03	4,43E-03	1,07E-02	0,98836	4,57E+03
	MG	Januária	1050,44	-3,58	-4,49	2,19E-03	4,11E-03	9,99E-03	0,98791	4,14E+03
	RJ	Cabo Frio	1064,56	-3,62	-4,57	2,20E-03	4,20E-03	1,02E-02	0,98815	4,20E+03
	RJ	Rio De Janeiro	1001,14	-3,42	-4,26	2,10E-03	3,89E-03	9,48E-03	0,98766	3,81E+03
	SP	Pradópolis	1111,06	-3,76	-4,79	2,27E-03	4,42E-03	1,07E-02	0,98846	4,51E+03
	SP	São Paulo	978,27	-3,35	-4,15	2,06E-03	3,78E-03	9,24E-03	0,98747	3,67E+03
	Sul	PR	Curitiba	957,48	-3,29	-4,06	2,03E-03	3,68E-03	9,03E-03	0,98732
PR		Londrina	1020,27	-3,48	-4,36	2,13E-03	3,99E-03	9,69E-03	0,98785	3,92E+03
RS		Ijuí	1087,70	-3,72	-4,63	2,28E-03	4,22E-03	1,03E-02	0,98763	4,50E+03
RS		Porto Alegre	991,59	-3,42	-4,17	2,13E-03	3,76E-03	9,28E-03	0,98682	3,88E+03
SC		Araranguá	1096,76	-3,74	-4,69	2,28E-03	4,29E-03	1,04E-02	0,98791	4,52E+03
SC		Florianópolis	1008,70	-3,47	-4,27	2,15E-03	3,87E-03	9,49E-03	0,98721	3,95E+03

Tabela A.3 Coeficientes obtidos para a equação ajustada para a energia fotovoltaica gerada – inverno

Região	UF	Cidade	Z <sub>0</sub>	a	b	c	d	f	R <sup>2</sup>	Chi <sup>2</sup>
Norte	AP	Macapá	0,322	1,50E-04	-2,67E-04	-1,11E-07	1,24E-07	8,26E-08	0,99372	3,616E-6
	AP	Oiapoque	0,309	1,37E-04	-2,43E-04	-1,01E-07	1,13E-07	7,52E-08	0,99385	2,953E-6
	AM	Coari	0,348	1,87E-04	-3,38E-04	-1,39E-07	1,58E-07	1,05E-07	0,99357	5,836E-6
	AM	Manaus	0,328	1,61E-04	-2,89E-04	-1,19E-07	1,35E-07	8,87E-08	0,99362	4,255E-6
	PA	Belém	0,346	1,83E-04	-3,32E-04	-1,36E-07	1,55E-07	1,03E-07	0,99364	5,521E-6
	PA	Marabá	0,362	2,05E-04	-3,71E-04	-1,52E-07	1,73E-07	1,15E-07	0,99356	7,009E-6
	RO	Porto Velho	0,334	1,64E-04	-2,97E-04	-1,21E-07	1,39E-07	9,16E-08	0,99391	4,256E-6
	RO	Vilhena	0,316	1,44E-04	-2,57E-04	-1,07E-07	1,21E-07	7,85E-08	0,99373	3,340E-6
	RR	Boa Vista	0,289	1,18E-04	-2,09E-04	-8,68E-08	9,75E-08	6,47E-08	0,99382	2,195E-6
	TO	Palmas	0,356	1,89E-04	-3,42E-04	-1,41E-07	1,60E-07	1,06E-07	0,99356	5,966E-6
TO	Tocantinópolis	0,359	1,92E-04	-3,48E-04	-1,43E-07	1,63E-07	1,08E-07	0,99356	6,162E-6	
Nordeste	AL	Pão De Açúcar	0,290	1,14E-04	-2,04E-04	-8,44E-08	9,49E-08	6,28E-08	0,99387	2,063E-6
	AL	Maceió	0,288	1,13E-04	-2,01E-04	-8,32E-08	9,34E-08	6,20E-08	0,99387	2,006E-6
	BH	Salvador	0,309	1,25E-04	-2,25E-04	-9,29E-08	1,04E-07	7,14E-08	0,99396	2,480E-6
	BH	Santa Rita De Cássia	0,375	1,99E-04	-3,64E-04	-1,49E-07	1,69E-07	1,14E-07	0,99356	6,700E-6
	CE	Acarauá	0,359	1,89E-04	-3,44E-04	-1,41E-07	1,61E-07	1,07E-07	0,99356	6,007E-6
	CE	Fortaleza	0,353	1,82E-04	-3,29E-04	-1,35E-07	1,53E-07	1,02E-07	0,99364	5,463E-6
	MA	Caxias	0,360	1,98E-04	-3,60E-04	-1,47E-07	1,68E-07	1,12E-07	0,99363	6,499E-6
	MA	São Luiz	0,346	1,78E-04	-3,23E-04	-1,32E-07	1,50E-07	1,01E-07	0,99371	5,215E-6
	PB	Cajazeiras	0,362	1,92E-04	-3,45E-04	-1,42E-07	1,61E-07	1,06E-07	0,99369	5,984E-6
	PB	João Pessoa	0,312	1,33E-04	-2,37E-04	-9,77E-08	1,11E-07	7,22E-08	0,99379	2,806E-6
	PE	Fernando de Noronha	0,344	1,67E-04	-2,99E-04	-1,24E-07	1,39E-07	9,27E-08	0,99365	4,568E-6
	PE	Recife	0,285	1,06E-04	-1,89E-04	-7,83E-08	8,84E-08	5,86E-08	0,99391	1,767E-6
	PI	Teresina	0,358	1,98E-04	-3,60E-04	-1,48E-07	1,68E-07	1,12E-07	0,99362	6,530E-6
	PI	Uruçuí	0,368	2,12E-04	-3,84E-04	-1,58E-07	1,79E-07	1,18E-07	0,99355	7,531E-6

Nordeste	RN	Cruzeta	0,334	1,62E-04	-2,93E-04	-1,20E-07	1,37E-07	9,03E-08	0,99385	4,185E-6
	RN	Natal	0,322	1,48E-04	-2,66E-04	-1,09E-07	1,24E-07	8,20E-08	0,99376	3,525E-6
	SE	Aracajú	0,304	1,29E-04	-2,29E-04	-9,51E-08	1,07E-07	7,10E-08	0,99381	2,640E-6
	SE	Propriá	0,412	2,76E-04	-4,99E-04	-2,06E-07	2,31E-07	1,55E-07	0,99334	1,309E-5
Centro Oeste	DF	Brasília	0,288	9,81E-05	-1,73E-04	-7,24E-08	8,01E-08	5,44E-08	0,99391	1,502E-6
	GO	Goiania	0,370	1,84E-04	-3,33E-04	-1,37E-07	1,54E-07	1,04E-07	0,99367	5,583E-6
	GO	Goiás	0,325	1,34E-04	-2,43E-04	-9,91E-08	1,13E-07	7,68E-08	0,99409	2,788E-6
	MG	Cuiabá	0,396	2,36E-04	-4,32E-04	-1,76E-07	2,00E-07	1,37E-07	0,99366	9,289E-6
	MG	Utiariti	0,357	1,81E-04	-3,30E-04	-1,35E-07	1,53E-07	1,05E-07	0,99374	5,413E-6
	MS	Campo Grande	0,257	8,30E-05	-1,48E-04	-6,10E-08	6,90E-08	4,57E-08	0,9941	1,049E-6
Sudeste	MS	Corumbá	0,319	1,37E-04	-2,45E-04	-1,01E-07	1,15E-07	7,48E-08	0,99388	2,943E-6
	ES	Conceição Da Barra	0,273	9,72E-05	-1,72E-04	-7,14E-08	8,03E-08	5,31E-08	0,99399	1,455E-6
	ES	Vitória	0,280	1,03E-04	-1,83E-04	-7,58E-08	8,52E-08	5,64E-08	0,99397	1,646E-6
	MG	Belo Horizonte	0,318	1,22E-04	-2,20E-04	-9,09E-08	1,01E-07	7,05E-08	0,99409	2,307E-6
	MG	Januária	0,346	1,51E-04	-2,70E-04	-1,13E-07	1,24E-07	8,68E-08	0,99377	3,666E-6
	RJ	Cabo Frio	0,294	1,08E-04	-1,92E-04	-7,98E-08	8,94E-08	5,95E-08	0,99394	1,824E-6
	RJ	Rio De Janeiro	0,254	7,76E-05	-1,37E-04	-5,70E-08	6,35E-08	4,25E-08	0,99408	9,131E-7
	SP	Pradópolis	0,323	1,31E-04	-2,38E-04	-9,71E-08	1,10E-07	7,50E-08	0,99395	2,737E-6
	SP	São Paulo	0,240	6,67E-05	-1,20E-04	-4,93E-08	5,53E-08	3,86E-08	0,99425	6,709E-7
	PR	Curitiba	0,228	6,02E-05	-1,07E-04	-4,41E-08	4,97E-08	3,31E-08	0,99413	5,496E-7
Sul	PR	Londrina	0,269	8,81E-05	-1,56E-04	-6,48E-08	7,27E-08	4,86E-08	0,99403	1,193E-6
	RS	Ijuí	0,270	7,41E-05	-1,29E-04	-5,63E-08	5,57E-08	4,58E-08	0,99365	9,016E-7
	RS	Porto Alegre	0,205	3,85E-05	-6,52E-05	-3,06E-08	2,39E-08	2,82E-08	0,99333	2,589E-7
	SC	Araranguá	0,290	9,19E-05	-1,62E-04	-6,85E-08	7,33E-08	5,28E-08	0,99384	1,337E-6
	SC	Florianópolis	0,232	5,50E-05	-9,65E-05	-4,15E-08	4,23E-08	3,36E-08	0,99392	4,778E-7

**APÊNDICE B – RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO BIDIMENSIONAL PARA O VERÃO**

Tabela B.1 Coeficientes obtidos para a equação ajustada para a energia gerada – verão

Região	UF	Cidade	$z_0$	a	b	c	d	f	R <sup>2</sup>	Chi <sup>2</sup>
Norte	AP	Macapá	12,73	-4,38E-02	-5,37E-02	2,73E-05	4,85E-05	1,19E-04	0,98698	0,63529
	AP	Oiapoque	13,06	-4,49E-02	-5,53E-02	2,78E-05	5,01E-05	1,23E-04	0,98722	0,66157
	AM	Fonte Boa	12,62	-4,34E-02	-5,33E-02	2,70E-05	4,81E-05	1,18E-04	0,98705	0,62253
	AM	Manaus	12,28	-4,24E-02	-5,16E-02	2,65E-05	4,65E-05	1,15E-04	0,98679	0,59600
	PA	Belém	12,53	-4,32E-02	-5,28E-02	2,69E-05	4,77E-05	1,18E-04	0,98697	0,61614
	PA	Soure	13,06	-4,48E-02	-5,54E-02	2,77E-05	5,03E-05	1,23E-04	0,98736	0,65782
	RO	Porto Velho	11,89	-4,12E-02	-4,97E-02	2,59E-05	4,46E-05	1,11E-04	0,98645	0,56714
	RO	Vilhena	12,15	-4,20E-02	-5,10E-02	2,63E-05	4,58E-05	1,13E-04	0,98667	0,58675
	RR	Boa Vista	12,43	-4,28E-02	-5,24E-02	2,67E-05	4,73E-05	1,17E-04	0,98693	0,60716
	TO	Palmas	12,66	-4,36E-02	-5,34E-02	2,71E-05	4,83E-05	1,19E-04	0,98704	0,62688
TO	Taguatinga	12,83	-4,41E-02	-5,42E-02	2,73E-05	4,91E-05	1,21E-04	0,98717	0,63967	
Nordeste	AL	Pão De Açúcar	12,87	-4,42E-02	-5,45E-02	2,73E-05	4,95E-05	1,21E-04	0,98734	0,63905
	AL	Maceió	13,13	-4,50E-02	-5,58E-02	2,77E-05	5,08E-05	1,24E-04	0,98752	0,65991
	BH	Salvador	13,26	-4,54E-02	-5,63E-02	2,80E-05	5,12E-05	1,25E-04	0,98749	0,67319
	BH	Santa Rita De Cássia	13,30	-4,55E-02	-5,65E-02	2,80E-05	5,14E-05	1,26E-04	0,98751	0,67655
	CE	Fortaleza	13,16	-4,51E-02	-5,58E-02	2,78E-05	5,08E-05	1,24E-04	0,98743	0,66505
	CE	Quixadá	13,26	-4,54E-02	-5,63E-02	2,80E-05	5,13E-05	1,25E-04	0,9875	0,67332
	MA	São Luiz	12,96	-4,45E-02	-5,49E-02	2,75E-05	4,99E-05	1,22E-04	0,98732	0,64870
	MA	Turialça	12,88	-4,42E-02	-5,45E-02	2,74E-05	4,95E-05	1,21E-04	0,98727	0,64224
	PB	João Pessoa	13,48	-4,61E-02	-5,73E-02	2,83E-05	5,23E-05	1,28E-04	0,98760	0,69210
	PB	São Gonçalo	13,48	-4,61E-02	-5,73E-02	2,83E-05	5,23E-05	1,28E-04	0,98760	0,69208
	PE	Barreiros	13,66	-4,66E-02	-5,82E-02	2,86E-05	5,32E-05	1,30E-04	0,98776	0,70544
	PE	Recife	12,79	-4,40E-02	-5,41E-02	2,73E-05	4,90E-05	1,20E-04	0,98717	0,63610
	PI	Paulistana	12,98	-4,45E-02	-5,50E-02	2,75E-05	4,99E-05	1,22E-04	0,98732	0,65035

	PI	Teresina	12,71	-4,37E-02	-5,37E-02	2,71E-05	4,86E-05	1,19E-04	0,98713	0,62951
	RN	Natal	13,33	-4,56E-02	-5,67E-02	2,80E-05	5,18E-05	1,26E-04	0,98766	0,67481
Nordeste	RN	Santa Cruz (Rn)	13,20	-4,52E-02	-5,61E-02	2,78E-05	5,12E-05	1,25E-04	0,98758	0,66501
	SE	Aracajú	13,36	-4,57E-02	-5,69E-02	2,80E-05	5,20E-05	1,27E-04	0,98770	0,6773
	SE	Propriá	13,22	-4,52E-02	-5,62E-02	2,78E-05	5,13E-05	1,25E-04	0,98761	0,66586
	DF	Brasília	12,52	-4,33E-02	-5,25E-02	2,71E-05	4,71E-05	1,17E-04	0,98658	0,62529
	GO	Goiás	12,70	-4,38E-02	-5,35E-02	2,72E-05	4,83E-05	1,19E-04	0,98694	0,63314
	GO	Minheiros	13,24	-4,54E-02	-5,61E-02	2,81E-05	5,09E-05	1,25E-04	0,98733	0,67603
Centro Oeste	MG	Coxipó Da Ponte	12,66	-4,36E-02	-5,34E-02	2,71E-05	4,83E-05	1,19E-04	0,98708	0,62529
	MG	Cuiabá	13,64	-4,66E-02	-5,82E-02	2,86E-05	5,32E-05	1,29E-04	0,98776	0,70403
	MS	Campo Grande	12,76	-4,39E-02	-5,39E-02	2,72E-05	4,88E-05	1,20E-04	0,98712	0,63482
	MS	Fazenda Rio Negro	13,55	-4,63E-02	-5,77E-02	2,84E-05	5,26E-05	1,28E-04	0,98766	0,69752
	ES	Conceição Da Barra	12,91	-4,44E-02	-5,46E-02	2,75E-05	4,95E-05	1,22E-04	0,98720	0,64721
	ES	Vitória	12,83	-4,41E-02	-5,42E-02	2,74E-05	4,91E-05	1,21E-04	0,98714	0,64068
	MG	Belo Horizonte	12,69	-4,37E-02	-5,35E-02	2,72E-05	4,82E-05	1,19E-04	0,98694	0,63196
Sudeste	MG	Ouro Fino	13,41	-4,60E-02	-5,69E-02	2,83E-05	5,18E-05	1,27E-04	0,98746	0,68988
	RJ	Cabo Frio	13,12	-4,50E-02	-5,56E-02	2,78E-05	5,06E-05	1,24E-04	0,98740	0,66162
	RJ	Rio De Janeiro	12,89	-4,43E-02	-5,45E-02	2,74E-05	4,95E-05	1,21E-04	0,98724	0,64378
	SP	Monte Alegre Do Sul	13,68	-4,68E-02	-5,81E-02	2,88E-05	5,29E-05	1,29E-04	0,98754	0,71453
	SP	São Paulo	12,63	-4,36E-02	-5,31E-02	2,72E-05	4,78E-05	1,18E-04	0,98680	0,63012
	PR	Curitiba	13,00	-4,47E-02	-5,49E-02	2,77E-05	4,97E-05	1,22E-04	0,98713	0,65833
	PR	Toledo	13,69	-4,69E-02	-5,83E-02	2,88E-05	5,31E-05	1,30E-04	0,98761	0,71453
Sul	RS	Passo Fundo	14,24	-4,85E-02	-6,10E-02	2,95E-05	5,60E-05	1,36E-04	0,98806	0,75551
	RS	Porto Alegre	13,59	-4,65E-02	-5,79E-02	2,85E-05	5,28E-05	1,29E-04	0,98766	0,70153
	SC	Curitibanos	13,98	-4,77E-02	-5,96E-02	2,92E-05	5,45E-05	1,33E-04	0,98778	0,73823
	SC	Florianópolis	13,20	-4,53E-02	-5,59E-02	2,80E-05	5,07E-05	1,24E-04	0,98727	0,67420

Tabela B.2 Coeficientes obtidos para a equação ajustada para o pico de potência – verão

Região	UF	Cidade	z <sub>0</sub>	a	b	c	d	f	R <sup>2</sup>	Chi <sup>2</sup>
Norte	AP	Macapá	1141,33	-3,84	-4,97	2,28E-03	4,64E-03	1,11E-02	0,9891	4,61E+03
	AP	Oiapoque	1005,46	-3,65	-4,36	2,16E-03	3,93E-03	1,10E-02	0,9903	3,55E+03
	AM	Fonte Boa	1132,55	-3,80	-4,93	2,26E-03	4,61E-03	1,10E-02	0,9891	4,53E+03
	AM	Manaus	1086,09	-3,66	-4,71	2,19E-03	4,38E-03	1,05E-02	0,9889	4,22E+03
	PA	Belém	1120,21	-3,77	-4,87	2,24E-03	4,55E-03	1,08E-02	0,9891	4,45E+03
	PA	Soure	1191,92	-3,99	-5,22	2,35E-03	4,90E-03	1,16E-02	0,9894	4,93E+03
	RO	Porto Velho	1033,77	-3,50	-4,46	2,11E-03	4,12E-03	9,92E-03	0,9885	3,90E+03
	RO	Vilhena	1069,06	-3,61	-4,63	2,16E-03	4,30E-03	1,03E-02	0,9887	4,12E+03
	RR	Boa Vista	1108,70	-3,73	-4,82	2,22E-03	4,49E-03	1,07E-02	0,989	4,36E+03
	TO	Palmas	1136,28	-3,82	-4,95	2,27E-03	4,63E-03	1,10E-02	0,9891	4,56E+03
TO	Taguatinga	1158,35	-3,88	-5,06	2,30E-03	4,74E-03	1,13E-02	0,9893	4,70E+03	
Nordeste	AL	Pão De Açúcar	1170,66	-3,92	-5,12	2,31E-03	4,81E-03	1,14E-02	0,9894	4,76E+03
	AL	Maceió	1206,33	-4,03	-5,30	2,36E-03	4,99E-03	1,18E-02	0,9896	5,01E+03
	BH	Salvador	1215,93	-4,06	-5,34	2,38E-03	5,02E-03	1,19E-02	0,9896	5,09E+03
	BH	Santa Rita De Cássia	1221,47	-4,08	-5,36	2,39E-03	5,05E-03	1,19E-02	0,9896	5,13E+03
	CE	Fortaleza	1204,43	-4,02	-5,28	2,36E-03	4,97E-03	1,18E-02	0,9895	5,01E+03
	CE	Quixadá	1218,31	-4,07	-5,35	2,39E-03	5,04E-03	1,19E-02	0,9896	5,11E+03
	MA	São Luiz	1179,70	-3,95	-5,16	2,33E-03	4,85E-03	1,15E-02	0,9894	4,84E+03
	MA	Turialça	1168,69	-3,91	-5,11	2,31E-03	4,79E-03	1,14E-02	0,9894	4,76E+03
	PB	João Pessoa	1245,37	-4,15	-5,48	2,43E-03	5,17E-03	1,22E-02	0,9897	5,31E+03
	PB	São Gonçalo	1245,50	-4,15	-5,48	2,43E-03	5,17E-03	1,22E-02	0,9897	5,31E+03
	PE	Barreiros	1270,82	-4,23	-5,60	2,46E-03	5,30E-03	1,25E-02	0,9898	5,48E+03
	PE	Recife	1154,35	-3,87	-5,04	2,29E-03	4,72E-03	1,12E-02	0,9893	4,67E+03
	PI	Paulistana	1180,86	-3,95	-5,17	2,33E-03	4,85E-03	1,15E-02	0,9894	4,85E+03
	PI	Teresina	1145,13	-3,84	-5,00	2,28E-03	4,67E-03	1,11E-02	0,9892	4,61E+03

	RN	Natal	1232,23	-4,11	-5,42	2,40E-03	5,12E-03	1,21E-02	0,9897	5,18E+03
Nordeste	RN	Santa Cruz (Rn)	1215,83	-4,05	-5,34	2,37E-03	5,04E-03	1,19E-02	0,98965	5,07E+03
	SE	Aracaju	1239,39	-4,13	-5,46	2,41E-03	5,16E-03	1,21E-02	0,98976	5,23E+03
	SE	Propriá	1220,18	-4,07	-5,36	2,38E-03	5,06E-03	1,19E-02	0,98967	5,10E+03
	DF	Brasília	1101,46	-3,72	-4,76	2,23E-03	4,42E-03	1,06E-02	0,98868	4,38E+03
Centro Oeste	GO	Goiás	1134,93	-3,82	-4,94	2,27E-03	4,61E-03	1,10E-02	0,98904	4,57E+03
	GO	Mineiros	1207,72	-4,04	-5,29	2,38E-03	4,97E-03	1,18E-02	0,98943	5,06E+03
	MG	Coxipó Da Ponte	1136,43	-3,81	-4,95	2,26E-03	4,63E-03	1,10E-02	0,98917	4,55E+03
	MG	Cuiabá	1269,26	-4,22	-5,59	2,46E-03	5,29E-03	1,25E-02	0,98983	5,47E+03
Sudeste	MS	Campo Grande	1149,78	-3,86	-5,01	2,29E-03	4,69E-03	1,12E-02	0,98921	4,64E+03
	MS	Fazenda Rio Negro	1255,47	-4,18	-5,53	2,44E-03	5,22E-03	1,23E-02	0,98973	5,38E+03
	ES	Conceição Da Barra	1169,89	-3,92	-5,11	2,32E-03	4,79E-03	1,14E-02	0,98929	4,79E+03
	ES	Vitória	1158,87	-3,89	-5,06	2,30E-03	4,73E-03	1,13E-02	0,98923	4,71E+03
Sul	MG	Belo Horizonte	1133,22	-3,81	-4,93	2,27E-03	4,60E-03	1,10E-02	0,98904	4,55E+03
	MG	Ouro Fino	1230,95	-4,11	-5,40	2,41E-03	5,08E-03	1,20E-02	0,98955	5,22E+03
	RJ	Cabo Frio	1199,42	-4,01	-5,26	2,36E-03	4,94E-03	1,17E-02	0,98948	4,98E+03
	RJ	Rio De Janeiro	1169,12	-3,92	-5,11	2,31E-03	4,79E-03	1,14E-02	0,98933	4,77E+03
Sul	SP	Monte Alegre Do Sul	1262,65	-4,21	-5,55	2,47E-03	5,23E-03	1,23E-02	0,98964	5,47E+03
	SP	São Paulo	1121,18	-3,78	-4,87	2,25E-03	4,53E-03	1,08E-02	0,9889	4,49E+03
	PR	Curitiba	1175,22	-3,94	-5,13	2,33E-03	4,80E-03	1,14E-02	0,98923	4,85E+03
	PR	Toledo	1268,50	-4,23	-5,58	2,47E-03	5,27E-03	1,24E-02	0,9897	5,50E+03
Sul	RS	Passo Fundo	1346,34	-4,46	-5,96	2,58E-03	5,67E-03	1,33E-02	0,99011	6,05E+03
	RS	Porto Alegre	1258,94	-4,19	-5,54	2,45E-03	5,23E-03	1,23E-02	0,98974	5,41E+03
	SC	Curitibanos	1306,56	-4,34	-5,76	2,53E-03	5,45E-03	1,28E-02	0,98985	5,79E+03
	SC	Florianópolis	1201,39	-4,02	-5,25	2,37E-03	4,93E-03	1,17E-02	0,98937	5,03E+03

Tabela B.3 Coeficientes obtidos para a equação ajustada para a energia fotovoltaica gerada – Verão

Região	UF	Cidade	Z <sub>0</sub>	a	b	c	d	f	R <sup>2</sup>	Chi <sup>2</sup>
Norte	AP	Macapá	0,35192	1,91E-04	-3,43E-04	-1,42E-07	1,59E-07	1,06E-07	0,99354	6,08E-06
	AP	Oiapoque	0,37353	2,23E-04	-4,00E-04	-1,66E-07	1,85E-07	1,23E-07	0,99347	8,32E-06
	AM	Fonte Boa	0,35137	1,96E-04	-3,56E-04	-1,46E-07	1,64E-07	1,12E-07	0,99383	6,20E-06
	AM	Manaus	0,32761	1,63E-04	-2,97E-04	-1,21E-07	1,37E-07	9,29E-08	0,99375	4,37E-06
	PA	Belém	0,34515	1,86E-04	-3,39E-04	-1,39E-07	1,56E-07	1,08E-07	0,99380	5,64E-06
	PA	Soure	0,38008	2,38E-04	-4,35E-04	-1,78E-07	2,00E-07	1,37E-07	0,99350	9,67E-06
	RO	Porto Velho	0,29783	1,30E-04	-2,35E-04	-9,65E-08	1,10E-07	7,30E-08	0,99376	2,75E-06
	RO	Vilhena	0,31757	1,52E-04	-2,74E-04	-1,12E-07	1,28E-07	8,44E-08	0,99378	3,73E-06
	RR	Boa Vista	0,34000	1,81E-04	-3,31E-04	-1,35E-07	1,56E-07	1,04E-07	0,99357	5,51E-06
	TO	Palmas	0,35289	1,96E-04	-3,56E-04	-1,46E-07	1,65E-07	1,12E-07	0,99391	6,11E-06
Nordeste	TO	Taguatinga	0,36349	2,12E-04	-3,84E-04	-1,57E-07	1,79E-07	1,20E-07	0,99385	7,19E-06
	AL	Pão De Açúcar	0,37051	2,34E-04	-4,21E-04	-1,74E-07	1,93E-07	1,31E-07	0,99379	8,78E-06
	AL	Maceio	0,38786	2,59E-04	-4,78E-04	-1,94E-07	2,21E-07	1,50E-07	0,99392	1,08E-05
	BH	Salvador	0,39154	2,59E-04	-4,75E-04	-1,94E-07	2,25E-07	1,47E-07	0,99343	1,14E-05
	BH	Santa Rita De Cássia	0,39360	2,63E-04	-4,82E-04	-1,97E-07	2,25E-07	1,51E-07	0,99338	1,19E-05
	CE	Fortaleza	0,38584	2,47E-04	-4,53E-04	-1,85E-07	2,05E-07	1,45E-07	0,99381	1,01E-05
	CE	Quixadá	0,39231	2,59E-04	-4,77E-04	-1,94E-07	2,20E-07	1,50E-07	0,99392	1,08E-05
	MA	São Luiz	0,37445	2,32E-04	-4,23E-04	-1,73E-07	1,96E-07	1,32E-07	0,99376	8,79E-06
	MA	Turiação	0,36913	2,24E-04	-4,07E-04	-1,67E-07	1,89E-07	1,28E-07	0,99368	8,30E-06
	PB	João Pessoa	0,40305	2,79E-04	-5,08E-04	-2,08E-07	2,34E-07	1,60E-07	0,99364	1,29E-05
Nordeste	PB	São Gonçalo	0,40281	2,79E-04	-5,08E-04	-2,09E-07	2,34E-07	1,60E-07	0,99360	1,30E-05
	PE	Barreiros	0,41363	3,06E-04	-5,56E-04	-2,30E-07	2,57E-07	1,74E-07	0,99335	1,61E-05
	PE	Recife	0,36189	2,13E-04	-3,85E-04	-1,59E-07	1,80E-07	1,20E-07	0,99348	7,63E-06
	PI	Paulistana	0,37500	2,33E-04	-4,23E-04	-1,74E-07	1,97E-07	1,32E-07	0,99371	8,82E-06
	PI	Teresina	0,35784	2,06E-04	-3,74E-04	-1,53E-07	1,73E-07	1,18E-07	0,99379	6,87E-06

	RN	Natal	0,39845	2,85E-04	-5,21E-04	-2,14E-07	2,41E-07	1,63E-07	0,99348	1,38E-05
Nordeste	RN	Santa Cruz (Rn)	0,39177	2,69E-04	-4,94E-04	-2,01E-07	2,30E-07	1,54E-07	0,99380	1,18E-05
	SE	Aracaju	0,40199	2,92E-04	-5,38E-04	-2,19E-07	2,49E-07	1,70E-07	0,99337	1,49E-05
	SE	Propriá	0,39420	2,74E-04	-5,07E-04	-2,06E-07	2,35E-07	1,61E-07	0,99354	1,29E-05
	DF	Brasília	0,32731	1,48E-04	-2,70E-04	-1,10E-07	1,27E-07	8,31E-08	0,99375	3,59E-06
Centro Oeste	GO	Goiás	0,35024	1,86E-04	-3,37E-04	-1,38E-07	1,55E-07	1,06E-07	0,99388	5,53E-06
	GO	Mineiros	0,38676	2,36E-04	-4,37E-04	-1,76E-07	2,04E-07	1,36E-07	0,99410	8,74E-06
	MG	Coxipó Da Ponte	0,35387	2,01E-04	-3,63E-04	-1,50E-07	1,70E-07	1,13E-07	0,99350	6,79E-06
	MG	Cuiabá	0,41364	3,07E-04	-5,59E-04	-2,30E-07	2,61E-07	1,74E-07	0,99328	1,64E-05
Sudeste	MS	Campo Grande	0,36033	2,06E-04	-3,75E-04	-1,53E-07	1,72E-07	1,18E-07	0,99382	6,91E-06
	MS	Fazenda Rio Negro	0,40797	2,89E-04	-5,26E-04	-2,16E-07	2,40E-07	1,66E-07	0,99363	1,40E-05
	ES	Conceição Da Barra	0,36874	2,19E-04	-3,96E-04	-1,63E-07	1,85E-07	1,22E-07	0,99365	7,90E-06
	ES	Vitória	0,36415	2,11E-04	-3,85E-04	-1,57E-07	1,80E-07	1,20E-07	0,99360	7,45E-06
Sul	MG	Belo Horizonte	0,34989	1,87E-04	-3,37E-04	-1,39E-07	1,57E-07	1,05E-07	0,99370	5,70E-06
	MG	Ouro Fino	0,39735	2,60E-04	-4,73E-04	-1,94E-07	2,21E-07	1,47E-07	0,99338	1,16E-05
	RJ	Cabo Frio	0,38483	2,46E-04	-4,51E-04	-1,83E-07	2,08E-07	1,40E-07	0,99351	1,03E-05
	RJ	Rio De Janeiro	0,36989	2,24E-04	-4,05E-04	-1,66E-07	1,88E-07	1,26E-07	0,99365	8,28E-06
Sul	SP	Monte Alegre Do Sul	0,41020	2,74E-04	-5,01E-04	-2,05E-07	2,31E-07	1,57E-07	0,99380	1,22E-05
	SP	São Paulo	0,34223	1,71E-04	-3,10E-04	-1,28E-07	1,42E-07	9,91E-08	0,99388	4,70E-06
	PR	Curitiba	0,37051	2,13E-04	-3,85E-04	-1,58E-07	1,78E-07	1,20E-07	0,99374	7,38E-06
	PR	Toledo	0,41365	2,84E-04	-5,21E-04	-2,12E-07	2,39E-07	1,65E-07	0,99357	1,37E-05
Sul	RS	Passo Fundo	0,44499	3,73E-04	-6,80E-04	-2,80E-07	3,17E-07	2,10E-07	0,99322	2,43E-05
	RS	Porto Alegre	0,41119	2,95E-04	-5,37E-04	-2,21E-07	2,51E-07	1,66E-07	0,99334	1,50E-05
	SC	Curitibanos	0,42994	3,17E-04	-5,82E-04	-2,38E-07	2,70E-07	1,82E-07	0,99337	1,74E-05
	SC	Florianópolis	0,38405	2,31E-04	-4,24E-04	-1,72E-07	2,00E-07	1,30E-07	0,99338	9,26E-06

## ANEXOS

## ANEXO I: TABELAS DE RADIAÇÃO SOLAR

Tabela C.1 Radiação solar global diária (MJ/m<sup>2</sup>) – Brasil

UF	CIDADE	Radiação Solar Global Diária (MJ/m <sup>2</sup> )												Média
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
AL	Pão De Açúcar	20,5	18,9	19,7	17,7	14,7	14,2	14,8	17,8	18,2	22,2	23,5	20,7	<b>18,58</b>
AL	Porto De Pedras	21,5	19,6	20,1	18,1	15,8	14,1	14,7	18,3	18,6	21,7	23,7	22,0	<b>19,02</b>
AL	Cupixi	11,3	12,8	11,4	11,3	10,9	11,7	13,6	16,2	16,0	18,3	14,8	14,4	<b>13,56</b>
AL	Macapá	15,3	15,2	14,5	14,6	16,1	16,4	19,4	21,6	22,0	22,9	21,6	18,6	<b>18,18</b>
AL	Oiapoque	18,4	17,3	17,8	16,2	14,4	15,6	15,6	20,0	24,7	22,2	22,7	20,2	<b>18,76</b>
AM	Barcelos	17,9	18,4	18,2	16,4	15,9	15,9	16,4	17,7	20,0	20,0	21,3	18,1	<b>18,02</b>
AM	Benjamin Constant	18,4	18,7	18,2	17,1	15,8	14,5	15,6	17,2	19,8	20,2	19,4	18,7	<b>17,80</b>
AM	Carauari	16,3	17,0	17,9	16,2	15,8	15,1	17,2	18,1	18,8	18,7	18,0	16,4	<b>17,13</b>
AM	Coari	15,5	16,5	14,3	14,3	16,7	18,4	20,6	21,7	21,5	19,5	18,2	16,5	<b>17,81</b>
AM	Codajás	16,4	15,2	16,8	15,7	16,8	15,2	19,8	21,6	19,6	19,6	19,1	16,6	<b>17,70</b>
AM	Eirunepé	16,1	16,7	18,2	16,6	15,8	13,8	17,4	17,5	19,7	19,4	17,9	17,2	<b>17,19</b>
AM	Fonte Boa	18,1	18,5	18,0	17,2	15,9	15,6	16,1	17,5	19,6	19,6	18,9	18,9	<b>17,83</b>
AM	Humaitá	16,1	16,2	16,1	15,8	16,6	17,1	17,5	18,7	18,2	17,2	17,7	15,5	<b>16,89</b>
AM	Iauareté	17,0	18,7	18,0	17,3	15,7	15,1	15,7	17,2	19,5	19,2	18,4	17,2	<b>17,42</b>
AM	Itacoatiara	13,7	14,0	13,5	13,6	14,9	15,0	17,6	18,6	17,2	15,8	15,6	14,3	<b>15,32</b>
AM	Lábrea	16,1	16,1	17,2	16,1	15,9	15,3	18,4	18,9	18,2	18,3	17,9	16,0	<b>17,03</b>
AM	Manaus	16,0	16,2	16,3	15,8	16,0	17,0	18,4	20,3	20,3	19,7	18,9	17,2	<b>17,68</b>
AM	Manicoré	16,1	15,9	15,9	16,0	16,2	16,7	18,9	20,2	18,9	18,9	18,2	16,8	<b>17,39</b>
AM	Parintins	16,8	16,6	16,9	15,9	16,4	16,8	17,6	20,0	21,5	20,6	19,4	18,2	<b>18,06</b>
AM	São Gabriel Cachoeira	16,4	17,0	18,0	16,7	16,7	15,6	17,1	18,2	18,7	19,2	18,1	18,4	<b>17,51</b>
AM	Taracua	16,0	16,5	16,1	14,8	14,6	14,6	15,2	16,9	18,7	18,2	17,0	16,9	<b>16,29</b>
AM	Tefé	15,9	16,2	16,4	15,7	14,8	14,9	17,2	19,2	18,2	19,1	18,0	16,6	<b>16,85</b>
AM	Uaupés	17,0	18,1	17,7	16,7	15,6	15,4	16,0	18,1	19,2	18,7	18,4	16,9	<b>17,32</b>
BH	Alagoinhas	22,8	21,0	19,7	16,3	13,7	13,3	14,7	16,7	17,9	19,0	21,3	21,5	<b>18,16</b>
BH	Barra	22,4	22,7	21,0	20,8	19,2	18,5	19,1	21,2	22,0	22,7	21,5	20,9	<b>21,00</b>
BH	Barreiras	23,0	21,8	20,0	20,3	18,8	18,1	18,6	20,8	21,5	22,2	21,1	20,6	<b>20,57</b>
BH	Bom Jesus Da Lapa	21,8	20,3	20,3	18,8	18,2	17,2	19,1	21,0	20,4	19,5	20,3	22,0	<b>19,91</b>
BH	Caetitê	20,6	21,6	19,7	17,9	16,0	15,4	15,8	18,7	20,3	20,6	19,2	19,4	<b>18,77</b>
BH	Canavieiras	23,0	22,3	20,7	16,8	15,0	14,2	15,2	17,0	19,2	18,6	19,4	22,5	<b>18,66</b>
BH	Caravelas	21,4	21,3	20,5	16,9	14,8	13,5	13,7	16,6	16,5	18,6	18,7	21,3	<b>17,82</b>
BH	Cipó	19,2	17,5	19,7	16,2	14,8	14,0	14,6	16,9	17,1	19,9	22,1	19,2	<b>17,60</b>
BH	Correntina	19,5	18,0	20,7	17,5	17,9	17,0	14,4	21,1	19,3	19,5	19,5	19,2	<b>18,63</b>
BH	Cruz Das Almas	19,3	20,2	19,2	17,0	14,5	13,6	14,8	17,3	17,6	19,5	21,0	18,7	<b>17,73</b>
BH	Exp. De Mandacarú	21,5	22,6	20,6	19,6	17,2	16,9	17,6	20,6	22,9	24,3	23,1	21,1	<b>20,67</b>
BH	Guaratinga	22,2	20,9	18,7	16,8	13,7	13,3	13,6	16,0	16,2	16,4	17,1	20,2	<b>17,09</b>
BH	Ibipetuba	19,6	18,2	19,3	17,2	17,3	16,8	19,5	21,6	20,6	19,9	20,9	18,9	<b>19,15</b>
BH	Ilhéus	22,7	22,3	20,0	17,6	15,7	14,3	14,6	17,0	18,9	20,5	20,4	21,5	<b>18,79</b>
BH	Irecê	21,5	20,5	20,4	18,8	16,5	16,4	18,5	20,8	20,5	21,0	21,3	22,1	<b>19,86</b>
BH	Itaberaba	18,6	18,7	19,2	16,4	14,5	12,5	14,2	15,7	16,3	18,8	18,6	19,9	<b>16,95</b>
BH	Itiruçu	21,0	20,3	18,4	15,7	12,9	13,4	13,5	15,1	17,3	16,0	18,1	20,6	<b>16,86</b>
BH	Ituaçu	18,0	17,2	19,6	16,2	14,5	12,5	14,9	18,4	16,9	19,2	20,4	19,7	<b>17,29</b>
BH	Jacobina	24,0	23,1	20,6	19,0	17,9	16,4	16,5	19,4	20,7	22,2	21,7	21,6	<b>20,26</b>
BH	Jaguaquara	18,0	17,2	18,1	15,2	13,3	12,3	12,8	15,2	15,5	16,8	18,0	18,8	<b>15,93</b>
BH	Juazeiro	21,2	22,2	20,7	19,8	18,3	16,9	17,8	20,6	23,1	23,9	22,5	20,6	<b>20,63</b>
BH	Lençóis	18,6	18,3	18,5	16,0	13,9	13,1	14,2	16,4	16,3	16,5	17,5	18,7	<b>16,50</b>
BH	Mandacarú	18,4	18,8	18,0	18,3	16,2	15,5	16,7	18,8	20,8	20,7	19,9	17,6	<b>18,31</b>

UF	CIDADE	Radiação Solar Global Diária (MJ/m <sup>2</sup> )												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
BH	Monte Santo	24,2	23,2	20,8	19,0	18,3	16,1	16,1	19,7	20,7	22,7	22,3	22,0	<b>20,43</b>
BH	Morro Do Chapéu	23,2	21,3	18,7	18,6	18,4	15,7	16,1	19,8	20,4	22,2	22,1	21,0	<b>19,79</b>
BH	Paratinga	21,0	22,3	19,2	19,7	18,3	17,2	17,4	20,0	20,2	20,7	19,5	20,2	<b>19,64</b>
BH	Paulo Afonso	21,5	19,7	18,6	19,6	16,5	14,3	14,7	16,3	18,7	21,2	21,6	21,0	<b>18,64</b>
BH	Remanso	19,9	21,4	19,4	20,7	17,1	18,6	16,8	20,0	21,7	21,9	21,5	21,3	<b>20,03</b>
BH	Rio Branco (Ba)	19,9	21,4	19,4	20,7	17,1	18,6	16,8	20,0	21,7	21,9	21,5	21,3	<b>20,03</b>
BH	São Gonçalo Campos	20,8	21,7	18,9	16,0	14,5	13,3	15,2	16,0	18,3	21,1	19,5	20,7	<b>18,00</b>
BH	Salvador	22,9	23,1	20,5	18,1	15,2	15,0	14,7	17,3	19,0	21,0	21,7	21,9	<b>19,20</b>
BH	Santa Rita De Cássia	20,2	21,2	22,1	20,6	20,0	19,2	19,7	21,8	22,6	22,0	21,8	22,1	<b>21,11</b>
BH	Senhor Do Bonfim	17,6	16,7	19,0	15,6	13,3	12,9	13,7	16,4	17,5	18,7	20,4	18,0	<b>16,65</b>
BH	Serrinha	18,8	17,9	20,0	16,8	14,0	13,5	14,8	16,6	17,4	19,9	21,7	18,6	<b>17,50</b>
BH	Vitória Da Conquista	18,9	17,3	19,8	15,6	14,5	12,4	14,2	18,1	16,4	17,2	18,1	19,0	<b>16,79</b>
CE	Acaráú	18,3	19,1	17,2	16,4	19,0	18,6	21,3	22,8	22,6	23,6	23,4	20,9	<b>20,27</b>
CE	Aracati	20,3	19,6	19,8	17,7	19,4	18,5	20,7	22,9	22,8	24,1	23,8	21,9	<b>20,96</b>
CE	Barbalha	18,3	18,0	18,3	18,0	18,1	17,2	18,6	21,7	21,2	21,7	22,3	21,0	<b>19,53</b>
CE	Campos Sales	17,9	16,9	17,6	17,0	18,2	17,3	19,4	21,8	21,2	21,6	21,9	20,5	<b>19,28</b>
CE	Crateús	18,0	18,2	18,0	17,0	18,0	17,5	19,5	21,5	21,4	22,6	21,2	20,5	<b>19,45</b>
CE	Fortaleza	20,7	19,8	18,1	17,6	18,3	18,2	19,4	21,5	22,7	23,4	22,8	21,5	<b>20,33</b>
CE	Guaramiranga	18,3	17,2	16,0	15,6	15,5	15,5	17,1	19,4	20,8	21,0	20,4	19,4	<b>18,02</b>
CE	Iguatu	20,6	20,2	19,2	19,0	18,8	17,9	19,1	21,3	22,9	22,8	22,1	21,5	<b>20,45</b>
CE	Jaguaruana	16,0	15,4	14,9	14,7	14,9	14,3	15,8	17,9	19,2	20,2	20,5	19,6	<b>16,95</b>
CE	Juazeiro Do Norte	18,6	19,4	18,3	18,8	18,9	17,6	18,4	20,8	22,3	23,1	21,1	20,1	<b>19,78</b>
CE	Morada Nova	17,3	16,7	16,7	16,0	14,6	15,7	15,6	18,1	19,5	20,7	18,8	17,9	<b>17,30</b>
CE	Mondubim	18,3	16,7	14,4	13,6	15,2	17,1	18,3	21,5	21,8	22,1	22,1	20,3	<b>18,45</b>
CE	Quixadá	20,6	20,0	19,2	18,6	18,5	17,8	19,1	21,4	22,6	22,9	22,5	22,0	<b>20,43</b>
CE	Quixeramobim	21,3	21,3	19,9	19,0	18,1	17,9	19,1	21,5	22,1	23,9	22,8	21,9	<b>20,73</b>
CE	Sobral	18,6	18,4	17,5	17,2	17,0	17,0	18,2	20,5	21,6	21,6	20,4	19,1	<b>18,93</b>
CE	Tauá	17,7	17,2	17,6	16,5	17,4	16,9	19,0	21,3	20,6	21,5	21,3	19,6	<b>18,88</b>
DF	Brasília	16,0	15,2	16,0	15,2	15,0	13,2	16,1	16,9	15,6	14,0	15,0	16,4	<b>15,38</b>
ES	Alegre	21,4	20,0	19,7	15,5	13,6	12,9	13,7	15,5	15,1	18,3	17,7	18,4	<b>16,82</b>
ES	Aracruz	20,9	18,9	19,4	15,2	13,6	11,3	14,0	15,7	13,9	17,2	17,2	18,3	<b>16,30</b>
ES	Cachoeiro Itapemirim	21,8	20,8	19,7	15,8	14,2	12,9	14,0	15,5	15,7	17,5	17,6	19,7	<b>17,10</b>
ES	Conceição Da Barra	23,6	21,7	19,1	16,2	14,1	13,0	13,2	15,4	16,7	17,9	18,7	20,0	<b>17,47</b>
ES	São Gabriel Da Palha	18,9	17,3	18,8	14,4	13,6	11,5	13,5	15,4	14,0	17,6	17,5	18,5	<b>15,92</b>
ES	São Mateus	15,9	16,4	13,8	11,4	10,3	9,0	10,0	11,5	11,5	11,7	13,6	15,1	<b>12,52</b>
ES	Venda Nova	18,6	17,4	18,7	14,7	13,2	12,3	13,1	15,3	13,8	16,8	15,6	16,7	<b>15,52</b>
ES	Vitória	22,4	22,4	19,5	16,4	14,7	13,4	13,5	16,1	16,7	17,8	18,3	19,6	<b>17,57</b>
GO	Aragarças	18,6	18,0	18,3	17,7	17,8	16,4	18,0	19,2	16,7	19,5	19,8	18,4	<b>18,20</b>
GO	Catalão	20,7	19,1	21,1	20,3	18,7	17,5	17,8	20,2	20,4	19,0	22,2	19,6	<b>19,72</b>
GO	Formosa	20,0	19,6	18,6	18,4	17,8	16,9	17,7	15,8	20,0	19,7	18,4	18,4	<b>18,44</b>
GO	Goiania	20,2	19,3	21,6	20,7	19,4	18,4	19,2	21,4	21,2	20,5	21,6	20,2	<b>20,31</b>
GO	Goiás	18,2	17,7	16,8	17,1	16,1	15,6	17,7	18,2	16,0	18,7	17,8	18,4	<b>17,36</b>
GO	Ipameri	18,9	20,0	19,6	16,2	15,1	16,6	17,0	18,2	17,1	19,5	18,3	18,9	<b>17,95</b>
GO	Luziana	22,1	20,3	18,7	18,9	17,3	16,7	17,6	19,4	19,9	20,0	20,2	18,9	<b>19,17</b>
GO	Mineiros	17,6	17,7	18,9	16,5	15,1	14,4	17,0	18,2	16,1	19,5	17,9	21,0	<b>17,49</b>
GO	Pirenópolis	19,5	18,7	18,4	18,3	17,2	16,9	17,6	19,3	19,1	19,7	18,7	18,1	<b>18,46</b>
GO	Posse	18,0	17,6	19,5	16,1	16,8	15,9	18,3	20,2	18,2	18,8	17,6	18,9	<b>17,99</b>
GO	Rio Verde	21,1	18,5	19,2	16,7	15,8	15,2	17,9	18,7	17,1	19,2	18,3	18,6	<b>18,03</b>
MA	Bacabal	15,3	16,3	15,7	14,6	17,8	18,0	19,4	20,2	19,6	18,0	18,8	18,1	<b>17,65</b>
MA	Balsas	16,5	15,1	16,0	16,7	18,1	18,4	15,3	22,4	20,5	18,6	18,1	17,2	<b>17,74</b>
MA	Barra Do Corda	18,4	17,9	16,1	15,7	17,1	18,1	19,6	21,3	21,6	21,4	20,2	19,3	<b>18,89</b>

UF	CIDADE	Radiação Solar Global Diária (MJ/m <sup>2</sup> )												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
MA	Carolina	15,2	15,4	16,9	17,6	18,4	18,6	19,3	19,7	17,9	16,9	16,1	15,1	<b>17,26</b>
MA	Caxias	19,0	18,6	18,1	18,1	18,9	19,0	20,0	22,2	22,5	22,3	21,1	19,6	<b>19,95</b>
MA	Chapadinha	15,9	17,3	16,8	16,4	18,9	18,1	19,9	22,4	21,8	22,1	21,3	19,1	<b>19,17</b>
MA	Colinas	16,3	15,4	15,7	15,4	17,4	18,4	20,3	21,6	19,5	18,5	15,6	17,0	<b>17,59</b>
MA	Coroatá	16,2	16,4	16,1	15,5	16,6	16,8	17,3	19,2	19,4	19,4	18,3	17,1	<b>17,36</b>
MA	Grajaú	16,3	15,7	16,1	16,1	17,8	17,8	19,6	20,2	17,8	17,0	17,1	16,2	<b>17,31</b>
MA	Imperatriz	17,7	17,6	17,0	17,6	18,0	18,7	19,5	21,0	20,4	20,4	18,9	18,3	<b>18,76</b>
MA	São Luiz	18,1	15,5	15,6	15,6	16,8	18,0	19,3	21,6	23,0	23,1	22,2	20,7	<b>19,13</b>
MA	Turiaçu	18,9	17,4	16,5	15,8	16,2	17,3	18,5	20,8	22,1	22,1	21,2	20,3	<b>18,93</b>
MT	Cáceres	19,2	18,4	17,9	16,9	15,0	14,3	15,6	17,1	17,3	20,5	19,7	19,0	<b>17,58</b>
MT	Central Plateau	18,9	17,9	18,0	18,3	17,9	17,9	18,6	20,1	19,7	19,7	18,8	18,0	<b>18,65</b>
MT	Cidade Vera	15,9	15,8	15,4	15,8	16,2	16,3	18,6	18,3	16,6	17,4	17,4	16,2	<b>16,66</b>
MT	Coxipó Da Ponte	17,8	17,7	18,7	17,2	16,8	15,2	16,7	19,3	18,4	19,5	21,0	19,1	<b>18,12</b>
MT	Cuiabá	23,6	21,6	23,7	22,5	22,0	20,9	21,3	24,2	23,7	25,0	26,5	23,9	<b>23,24</b>
MT	Diamantino	17,7	17,2	18,0	16,7	16,4	15,5	17,6	18,6	17,2	19,2	18,8	17,8	<b>17,56</b>
MT	Engenho De Dentro	19,0	20,6	18,4	17,2	15,9	15,0	16,2	17,6	17,8	18,9	19,5	18,7	<b>17,90</b>
MT	Meruri Santa Cruz	17,4	17,7	17,6	16,8	15,8	15,3	15,1	17,3	16,4	18,1	19,7	16,9	<b>17,01</b>
MT	Presidente Murtinho	18,7	17,2	16,9	17,5	16,1	15,6	16,6	18,2	18,4	20,2	18,5	17,7	<b>17,63</b>
MT	Rio Xingú	16,5	16,3	15,0	16,2	16,5	17,0	17,9	18,6	16,9	17,9	17,4	16,3	<b>16,88</b>
MT	Utiariti	17,1	17,1	18,6	18,3	18,8	18,2	19,1	21,5	21,2	20,6	21,6	17,9	<b>19,17</b>
MS	Água Clara	19,5	18,9	19,2	16,7	15,6	13,6	15,1	16,3	16,8	20,1	21,9	19,4	<b>17,76</b>
MS	Aquidauana	21,0	19,3	18,6	17,1	15,1	13,3	14,3	16,2	17,4	19,7	22,1	21,1	<b>17,93</b>
MS	Bela Vista	20,6	21,0	19,3	17,1	14,7	12,5	13,5	15,7	17,2	19,3	21,2	20,0	<b>17,68</b>
MS	Campo Grande	21,3	19,4	18,7	18,2	15,6	12,0	14,9	16,0	16,3	19,7	21,6	19,4	<b>17,76</b>
MS	Corumbá	24,3	22,4	21,6	19,7	17,3	15,6	16,2	18,6	20,3	22,8	25,4	22,5	<b>20,56</b>
MS	Coxim	18,9	18,8	18,5	16,3	15,4	14,1	16,6	15,8	15,7	19,9	20,0	19,9	<b>17,49</b>
MS	Dourados	20,2	19,3	18,8	16,1	14,6	12,7	14,0	14,9	14,9	19,8	21,9	20,7	<b>17,33</b>
MS	Fazenda São João	20,2	17,8	20,0	18,8	15,9	15,3	15,4	17,3	17,8	20,3	20,6	21,7	<b>18,43</b>
MS	Fazenda Rio Negro	22,1	20,6	20,2	18,7	14,9	13,8	14,9	15,9	16,2	21,1	21,3	23,2	<b>18,58</b>
MS	Ivinhema	22,8	22,7	20,7	18,9	15,6	13,2	15,0	15,1	15,5	20,5	22,7	21,4	<b>18,68</b>
MS	Paranaíba	19,7	20,0	19,4	17,0	16,2	14,3	16,3	17,3	17,3	20,6	21,3	20,0	<b>18,28</b>
MS	Ponta Porã	22,5	21,6	19,7	17,2	14,5	11,6	14,0	15,0	17,2	20,2	22,0	21,5	<b>18,08</b>
MS	Três Lagoas	22,3	22,8	20,7	18,2	15,6	14,4	15,8	16,8	17,3	21,3	22,1	20,2	<b>18,96</b>
MG	Aimorés	22,1	21,5	19,8	17,6	15,1	13,6	14,7	17,0	16,3	18,7	19,2	20,4	<b>18,00</b>
MG	Almenara	22,4	21,6	19,8	17,0	15,1	13,9	14,1	16,9	18,2	19,4	19,2	19,9	<b>18,13</b>
MG	Araçuaí	23,3	22,1	20,0	17,4	15,9	14,6	15,0	17,5	18,2	19,8	20,1	20,3	<b>18,68</b>
MG	Araxá	19,3	18,9	18,7	16,7	16,0	15,0	16,6	18,2	17,6	19,5	19,2	18,7	<b>17,87</b>
MG	Arinos	18,2	17,7	20,1	16,1	16,4	15,6	17,7	19,8	18,0	19,2	17,4	18,0	<b>17,85</b>
MG	Bambuí	19,4	20,0	18,7	16,0	15,5	14,6	16,1	17,5	16,8	18,7	18,4	17,5	<b>17,43</b>
MG	Barbacena	19,4	20,0	17,9	15,2	14,2	12,7	13,5	16,1	15,4	17,5	18,1	18,8	<b>16,57</b>
MG	Belo Horizonte	20,6	20,0	19,0	17,3	15,5	14,9	15,4	17,4	17,7	18,9	19,5	18,4	<b>17,88</b>
MG	Bom Despacho	13,3	21,6	16,6	16,9	16,2	16,0	16,7	16,6	18,5	21,4	20,4	18,1	<b>17,69</b>
MG	Bonfinópolis	16,3	21,0	18,8	18,9	17,2	16,2	16,2	17,2	18,1	18,7	20,0	17,0	<b>17,97</b>
MG	Cambuquira	19,1	19,6	19,2	15,6	14,7	13,0	15,2	16,5	16,2	19,0	18,5	18,5	<b>17,09</b>
MG	Caparaó	20,1	21,2	19,0	16,0	14,3	13,3	14,4	16,5	16,4	18,0	18,9	19,2	<b>17,28</b>
MG	Capinópolis	19,6	20,0	17,7	16,9	16,8	15,6	17,1	18,2	17,4	20,2	20,0	19,4	<b>18,24</b>
MG	Caratinga	20,9	20,8	19,1	16,0	14,4	12,2	14,5	16,6	15,8	17,2	18,4	18,8	<b>17,06</b>
MG	Cataguases	21,4	20,0	16,8	15,4	13,8	12,3	13,7	15,1	14,7	16,8	18,1	19,3	<b>16,45</b>
MG	Carmo Do Rio Claro	18,3	17,2	16,8	16,7	13,0	14,1	13,8	13,6	17,8	20,0	20,0	17,2	<b>16,54</b>
MG	Capelinha	16,0	19,5	17,0	15,3		12,7		16,3	14,1	15,8	17,4	14,9	<b>15,90</b>
MG	Caxambú	18,2	17,0	18,6	16,1	14,4	12,4	14,0	16,4	17,4	17,9	20,6	19,6	<b>16,88</b>

UF	CIDADE	Radiação Solar Global Diária (MJ/m <sup>2</sup> )												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
MG	Conceição Mato Dentro	20,0	19,2	18,0	15,3	13,8	12,7	14,3	17,2	15,6	17,2	17,5	18,7	<b>16,63</b>
MG	Curvelo	22,2	20,7	19,1	17,4	15,5	14,3	15,0	17,3	17,8	19,0	19,6	18,8	<b>18,06</b>
MG	Diamantina	19,9	19,6	18,5	16,1	15,5	14,2	15,1	18,7	17,8	18,0	17,9	19,0	<b>17,53</b>
MG	Espinosa	21,2	19,9	21,3	17,5	17,2	16,2	17,7	20,3	18,8	19,2	18,9	21,5	<b>19,14</b>
MG	Frutal	21,3	19,5	19,3	18,2	16,1	15,1	15,8	18,0	18,5	18,9	21,4	20,5	<b>18,55</b>
MG	Governador Valadares	19,6	20,0	18,8	15,6	13,6	12,2	13,8	15,7	15,0	16,4	18,0	19,5	<b>16,52</b>
MG	Grão Mogol	22,5	21,1	19,1	17,4	16,1	14,6	15,1	17,9	18,4	19,8	19,6	19,4	<b>18,42</b>
MG	Ibirité	19,0	19,6	18,4	16,7	15,5	13,9	15,0	17,2	16,8	18,0	18,0	19,2	<b>17,28</b>
MG	Itabira	21,8	19,7	18,1	16,2	14,8	13,1	13,7	16,6	16,9	18,3	18,6	18,0	<b>17,15</b>
MG	Itajubá	21,5	19,0	17,8	15,8	13,9	12,8	13,6	15,9	16,3	17,6	19,1	18,4	<b>16,81</b>
MG	Itamarandiba	20,3	20,0	18,9	16,1	14,7	13,2	20,2	16,8	16,1	16,8	18,7	18,6	<b>17,53</b>
MG	Janaúba	19,2	19,5	16,5	16,7	16,9	15,1	16,5	20,0	18,7	20,7	19,0	20,0	<b>18,23</b>
MG	Januária	21,2	18,5	21,3	18,1	17,0	16,6	18,1	20,5	18,8	20,3	19,3	20,3	<b>19,17</b>
MG	Jequitinhonha	17,5	21,4	20,1	15,8	14,3	12,7	12,0	15,3	15,6	17,8	20,0	18,6	<b>16,76</b>
MG	João Monlevade	19,0	18,9	17,2	14,8	13,3	12,5	14,0	16,0	14,8	16,8	16,4	17,5	<b>15,93</b>
MG	Juíz De Fora	17,9	18,1	16,0	13,3	12,6	11,2	13,5	14,2	13,3	15,6	16,9	17,3	<b>14,99</b>
MG	Lagoa Santa	18,5	17,8	19,4	17,0	15,7	14,0	15,8	17,6	18,0	17,6	19,2	18,7	<b>17,44</b>
MG	Lavras	20,6	23,0	19,3	17,0	16,0	14,1	15,8	17,9	17,4	19,4	19,3	19,6	<b>18,28</b>
MG	Leopoldina	19,2	19,3	17,3	14,9	13,1	12,2	12,8	14,8	14,6	15,9	17,5	17,7	<b>15,78</b>
MG	Machado	18,6	18,5	17,5	15,4	14,0	12,3	14,1	16,0	15,7	16,8	18,1	18,9	<b>16,33</b>
MG	Montalvânia	17,9	23,1	20,0	18,7	17,3	16,2	16,4	18,7	19,8	18,1	18,0	18,1	<b>18,53</b>
MG	Monte Alegre Minas	18,9	17,7	19,1	17,4	16,1	14,2	15,7	17,8	18,3	18,7	22,0	19,5	<b>17,95</b>
MG	Monte Azul	21,2	19,6	20,6	17,9	16,9	15,9	17,7	20,0	19,2	18,8	18,9	21,1	<b>18,98</b>
MG	Montes Claros	21,3	20,3	19,8	18,0	16,9	15,9	17,4	19,8	19,0	18,8	18,2	20,0	<b>18,78</b>
MG	Muriae	22,3	20,3	18,9	15,6	13,6	12,5	13,0	15,6	16,1	17,2	18,3	18,7	<b>16,84</b>
MG	Oliveira	20,5	20,0	19,0	16,6	15,9	14,4	16,0	17,7	17,4	19,1	19,3	20,1	<b>18,00</b>
MG	Ouro Fino	19,1	18,1	18,5	16,7	15,6	13,6	15,1	16,6	17,2	19,4	20,2	21,9	<b>17,67</b>
MG	Ouro Preto	17,9	18,3	16,4	15,2	13,6	13,1	13,3	15,5	15,6	16,4	16,9	16,1	<b>15,69</b>
MG	Paracatu	19,8	19,2	18,6	16,9	15,8	15,6	17,1	17,7	17,5	18,0	18,2	19,3	<b>17,81</b>
MG	Passa Quatro	18,7	18,9	18,8	16,1	14,8	12,7	14,3	16,5	15,6	18,6	20,2	19,4	<b>17,05</b>
MG	Patos De Minas	20,0	19,6	19,1	17,1	16,3	15,1	17,0	19,2	17,9	19,1	19,2	19,1	<b>18,23</b>
MG	Pedra Azul	17,8	19,9	19,8	16,1	14,9	12,5	14,5	17,9	16,7	17,6	17,4	20,0	<b>17,09</b>
MG	Pirapora	20,2	19,2	20,3	17,7	18,0	16,2	17,5	19,7	19,5	19,5	21,1	18,5	<b>18,95</b>
MG	Poços De Caldas	19,1	17,8	17,8	16,5	14,4	12,8	14,2	17,0	16,9	18,7	19,8	19,8	<b>17,07</b>
MG	Pompeu	20,4	20,0	19,8	16,8	15,5	14,0	15,4	16,0	16,3	19,5	18,4	19,5	<b>17,63</b>
MG	Prata	18,8	20,2	17,9	17,3	15,4	15,6	15,8	16,4	18,3	21,3	21,3	20,0	<b>18,19</b>
MG	Salinas	19,7	18,4	19,8	15,2	14,0	12,5	14,0	17,9	16,3	17,6	17,8	19,2	<b>16,87</b>
MG	São Francisco	22,9	21,4	19,3	18,6	16,9	15,9	16,8	18,7	19,4	20,7	20,4	19,7	<b>19,23</b>
MG	Santa Rita De Caldas	18,4	16,2	16,2	16,4	13,8	14,3	14,3	14,9	16,6	20,2	19,1	17,2	<b>16,47</b>
MG	Santos Dumont	17,9	17,0	16,8	14,6	14,0	10,7	12,8	15,4	16,4	14,8	19,0	18,5	<b>15,66</b>
MG	São João Del Rei	16,0	15,6	14,4	13,0	11,5	10,6	11,5	13,5	13,3	14,5	15,1	14,7	<b>13,64</b>
MG	São Lourenço	19,5	19,6	18,2	15,6	14,4	12,4	13,5	16,5	16,9	19,8	17,7	18,9	<b>16,92</b>
MG	São Pedro De Ferros	15,4	19,3	17,0	16,7	13,9	13,7	13,4	13,5	14,8	17,5	17,5	15,6	<b>15,69</b>
MG	Sete Lagoas	20,9	21,2	20,2	17,9	16,8	15,2	17,1	19,7	18,3	19,5	19,2	20,4	<b>18,87</b>
MG	Teófilo Otoni	21,1	20,0	19,2	15,8	14,4	12,2	13,5	15,9	15,4	16,8	17,5	19,4	<b>16,77</b>
MG	Três Corações	21,2	19,2	17,7	16,0	14,0	12,8	13,7	16,1	16,3	17,6	18,9	18,2	<b>16,81</b>
MG	Uberaba	20,5	20,4	19,8	17,6	16,6	15,1	16,9	18,7	18,5	20,6	21,7	19,6	<b>18,83</b>
MG	Usina Jaguara	18,1	19,7	17,0	17,3	14,7	14,9	14,8	14,9	17,7	19,9	19,9	18,1	<b>17,25</b>
MG	Usina São Simão	19,5	21,1	18,1	18,5	15,4	15,7	16,2	15,8	18,3	22,0	21,9	19,9	<b>18,53</b>
MG	Usina Três Marias	17,0	20,9	19,9	18,1	15,6	15,7	15,8	16,9	17,9	19,7	20,1	17,9	<b>17,96</b>
MG	Viçosa	20,6	20,8	19,0	15,8	14,7	12,9	14,2	16,4	15,7	17,1	18,1	19,7	<b>17,08</b>

UF	CIDADE	Radiação Solar Global Diária (MJ/m <sup>2</sup> )												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
PA	Alenquer	18,4	19,4	18,5	18,4	17,9	17,1	17,1	17,9	19,5	18,9	18,9	17,3	<b>18,43</b>
PA	Altamira	16,4	15,9	15,2	15,4	16,4	17,6	19,2	20,2	21,4	20,2	19,4	17,7	<b>17,92</b>
PA	Alto Tapajós	17,4	18,1	17,6	17,2	17,4	17,7	18,0	20,1	19,2	20,3	18,7	17,9	<b>18,30</b>
PA	Arumanduba	13,9	14,3	14,6	14,7	14,9	13,8	14,6	15,4	14,6	15,1	14,6	13,8	<b>14,53</b>
PA	Belém	15,6	15,0	15,0	14,8	17,6	18,2	20,4	21,7	20,1	21,2	20,2	18,4	<b>18,18</b>
PA	Belterra	15,8	15,1	14,2	14,7	18,3	15,7	18,6	20,7	20,4	20,6	20,1	17,2	<b>17,62</b>
PA	Breves	15,6	15,4	15,0	14,8	17,2	17,9	21,1	22,0	21,2	21,6	20,2	18,7	<b>18,39</b>
PA	Cametá	16,0	16,1	18,0	17,2	18,6	18,5	19,9	22,0	21,5	21,5	20,3	19,5	<b>19,09</b>
PA	Capitão Poço	15,6	16,0	16,9	17,2	18,6	18,5	17,5	19,4	19,3	18,9	17,2	15,7	<b>17,39</b>
PA	Cachimbo	15,6	15,4	14,8	15,7	17,9	18,5	19,3	19,7	16,8	17,4	17,1	15,6	<b>16,98</b>
PA	Clevalândia	16,4	16,2	15,6	15,9	15,4	16,5	18,0	19,5	19,8	21,2	19,7	17,3	<b>17,63</b>
PA	Conceição Do Araguaia	17,2	16,4	17,8	17,2	18,4	19,2	19,9	21,8	19,3	17,9	17,3	17,3	<b>18,31</b>
PA	Itaituba	16,4	15,2	16,8	15,6	16,7	17,0	19,7	21,5	19,6	19,6	19,2	16,7	<b>17,83</b>
PA	Marabá	15,7	15,9	16,3	13,9	17,9	19,3	20,3	21,9	18,4	18,7	18,1	17,6	<b>17,83</b>
PA	Monte Alegre	16,4	16,1	16,8	15,8	17,8	16,5	19,9	21,6	21,2	21,6	20,3	18,5	<b>18,54</b>
PA	Óbidos	16,0	16,1	15,7	15,8	17,2	17,5	20,9	22,7	21,2	21,3	20,3	17,7	<b>18,53</b>
PA	Porto De Moz	14,6	14,0	15,0	15,5	17,5	17,2	19,9	20,5	21,2	22,8	20,3	16,6	<b>17,93</b>
PA	Santarém	16,4	15,1	14,6	15,1	15,2	16,7	18,6	19,7	21,8	22,3	19,8	19,1	<b>17,87</b>
PA	São Félix Do Xingú	13,8	13,5	15,0	14,4	15,3	17,0	18,8	19,1	17,0	16,7	16,0	15,2	<b>15,98</b>
PA	Soure	17,7	15,9	15,9	16,5	17,9	19,0	20,2	21,8	22,9	23,0	22,0	21,0	<b>19,48</b>
PA	Taperinha	17,7	16,2	15,4	16,0	15,7	17,7	19,9	23,0	23,6	23,9	20,5	18,3	<b>18,99</b>
PA	Tomé Açu	15,2	16,2	15,8	16,0	15,7	17,7	18,7	21,0	17,0	17,7	16,6	16,1	<b>16,37</b>
PA	Tracuateua	15,6	15,0	14,6	14,1	15,9	16,4	18,7	21,0	20,8	22,3	21,6	18,6	<b>17,88</b>
PA	Tucuruí	15,2	14,1	16,8	16,0	17,2	18,1	19,6	19,9	17,9	17,6	17,2	16,9	<b>17,21</b>
PB	Araruna	20,4	19,8	19,7	20,0	18,0	15,8	16,1	18,9	19,9	20,7	20,4	19,9	<b>19,13</b>
PB	Barra De Santa Rosa	20,8	20,9	18,9	19,3	16,3	15,5	14,5	18,2	20,2	21,1	21,2	20,3	<b>18,93</b>
PB	Brejo Do Cruz	21,9	23,1	23,0	21,5	18,6	18,4	18,0	21,3	22,8	23,7	22,6	21,7	<b>21,38</b>
PB	Cabaceiras	21,7	22,1	21,1	19,6	16,8	16,2	15,5	18,7	20,5	22,6	22,4	21,5	<b>19,89</b>
PB	Cajazeiras	21,6	21,7	21,8	21,7	17,9	18,7	18,4	22,2	23,8	23,4	23,1	21,8	<b>21,34</b>
PB	Campina Grande	21,2	21,8	20,8	18,7	16,4	14,4	15,7	17,7	20,3	21,6	22,9	22,7	<b>19,52</b>
PB	Esperança	21,6	22,1	21,1	20,3	17,2	15,1	15,3	18,5	20,5	21,8	22,4	21,8	<b>19,81</b>
PB	Guarabira	22,4	22,4	21,4	19,4	17,5	15,8	16,6	18,6	21,3	22,9	23,5	23,5	<b>20,44</b>
PB	João Pessoa	19,3	20,6	19,8	18,1	18,2	15,4	16,4	19,4	20,5	23,1	23,8	22,8	<b>19,78</b>
PB	Mogeirol	20,2	19,0	19,2	18,9	15,9	15,0	14,4	17,1	19,4	20,3	20,2	19,6	<b>18,27</b>
PB	Monteiro	22,5	22,5	22,1	20,5	17,4	17,6	16,6	21,0	22,3	23,0	22,5	21,6	<b>20,80</b>
PB	Patos	23,1	23,2	23,0	21,3	18,8	17,2	16,9	20,8	22,7	23,0	22,4	21,8	<b>21,18</b>
PB	Picuí	20,8	20,5	20,0	19,7	17,3	17,1	16,7	20,0	22,1	21,8	21,9	20,2	<b>19,84</b>
PB	Pombal	22,0	22,1	21,5	20,7	17,6	17,9	17,3	20,9	23,1	23,4	23,1	21,8	<b>20,95</b>
PB	Princesa Isabel	22,1	21,0	21,8	20,6	17,7	17,0	17,6	21,6	23,4	22,5	22,5	22,3	<b>20,84</b>
PB	São Gonçalo	21,9	21,3	20,7	19,8	22,1	17,9	19,1	22,2	23,1	24,5	24,2	22,8	<b>21,63</b>
PB	Teixeira	22,4	21,3	21,5	21,0	17,5	17,5	17,1	21,5	22,7	22,6	20,9	21,1	<b>20,59</b>
PB	Triunfo (Pb)	20,2	20,3	19,8	18,0	17,3	15,2	16,5	20,5	20,8	22,8	22,8	21,9	<b>19,68</b>
PR	Campo Largo	17,7	17,0	16,4	13,5	12,0	10,9	11,5	12,5	12,9	16,2	19,1	18,4	<b>14,84</b>
PR	Campo Mourão	20,0	20,0	18,6	15,3	13,4	12,0	13,1	14,0	15,7	19,3	21,9	21,2	<b>17,04</b>
PR	Cascavel	18,2	17,7	15,7	13,6	11,4	9,3	10,5	12,3	13,2	15,9	18,7	19,3	<b>14,65</b>
PR	Castro	18,1	17,3	16,4	14,5	12,6	10,4	12,6	13,5	13,9	18,1	18,7	20,0	<b>15,51</b>
PR	Colombo	19,7	18,5	17,0	14,4	12,9	10,9	11,9	13,6	14,5	17,0	19,5	19,7	<b>15,80</b>
PR	Curitiba	19,0	18,2	16,3	13,6	11,6	10,2	11,3	12,9	13,9	15,9	18,5	19,7	<b>15,09</b>
PR	Foz Do Iguaçu	22,8	20,6	18,8	16,7	12,6	10,6	10,3	12,0	14,9	16,3	20,5	22,6	<b>16,56</b>
PR	Guaira	20,8	20,0	18,6	15,8	13,4	11,1	13,1	13,7	14,4	19,0	21,9	22,5	<b>17,03</b>
PR	Guarapuava	19,3	17,7	17,4	14,7	13,4	11,1	12,4	14,1	14,4	17,8	20,7	20,0	<b>16,08</b>

UF	CIDADE	Radiação Solar Global Diária (MJ/m <sup>2</sup> )												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
PR	Irati	18,2	17,3	15,9	13,7	11,5	9,7	11,2	13,2	13,4	15,9	18,9	19,2	<b>14,84</b>
PR	Ivaí	18,2	17,1	16,1	14,6	11,6	10,0	11,3	13,3	13,4	15,5	18,4	18,6	<b>14,84</b>
PR	Jacarezinho	20,0	20,0	19,5	16,6	14,4	12,3	14,1	15,6	16,1	20,1	21,1	20,7	<b>17,54</b>
PR	Jaguariaíva	18,8	19,2	17,6	15,8	14,1	11,6	13,4	15,3	15,7	19,7	20,7	21,2	<b>16,93</b>
PR	Londrina	19,6	19,2	19,1	16,5	14,5	12,4	14,2	14,9	15,7	19,7	21,5	20,4	<b>17,31</b>
PR	Maringá	19,6	20,7	19,1	15,7	14,0	10,8	13,5	14,9	14,8	19,3	21,1	22,0	<b>17,13</b>
PR	Palmas	18,9	16,9	16,2	14,4	12,7	10,0	11,2	13,1	14,7	17,7	20,4	21,0	<b>15,60</b>
PR	Ponta Grossa	19,7	18,5	17,1	15,6	13,8	11,1	13,0	14,8	15,5	17,8	20,3	20,5	<b>16,48</b>
PR	Quedas Do Iguaçú	18,7	17,9	16,0	13,4	11,3	9,3	10,5	12,6	13,4	16,3	19,4	20,1	<b>14,91</b>
PR	Rio Negro	16,9	17,7	16,0	13,4	11,3	9,9	11,3	12,4	13,5	16,6	19,6		<b>14,42</b>
PR	São Mateus Do Sul	19,7	19,6	17,4	15,4	14,0	12,2	13,6	15,7	16,0	17,7	18,3	19,3	<b>16,58</b>
PR	Toledo	20,4	21,0	18,9	16,5	13,7	11,2	13,0	14,1	14,9	19,6	21,1	23,0	<b>17,28</b>
PR	Umuarama	18,3	18,0	16,2	14,2	12,1	9,8	11,3	12,8	13,7	16,2	18,8	19,2	<b>15,05</b>
PE	Afogados Da Ingazeira	20,1	20,0	19,1	17,4	14,9	13,6	14,4	16,3	19,0	20,5	21,4	21,3	<b>18,17</b>
PE	Araripina	19,7	19,1	18,1	17,6	17,2	16,8	17,8	19,9	21,0	21,5	21,2	20,1	<b>19,17</b>
PE	Arcoverde	21,0	19,9	20,5	18,6	16,2	15,1	16,1	20,8	20,4	23,2	23,7	20,8	<b>19,69</b>
PE	Barreiros	23,0	21,3	20,0	19,0	15,5	15,2	15,6	17,3	19,9	22,6	22,8	23,9	<b>19,68</b>
PE	Bebedouro	19,6	20,7	20,2	17,6	15,6	14,6	16,1	18,5	20,8	21,5	21,5	19,9	<b>18,88</b>
PE	Belém De São Francisco	21,1	20,6	19,4	18,2	15,8	14,6	15,3	17,1	19,3	20,9	21,5	21,3	<b>18,76</b>
PE	Bom Conselho	21,4	21,0	19,8	18,3	15,4	14,2	14,9	16,4	19,4	21,0	22,4	22,3	<b>18,88</b>
PE	Cabrobó	21,0	19,6	20,1	18,2	17,2	15,4	16,7	20,5	20,1	21,0	23,7	21,9	<b>19,62</b>
PE	Caruaru	19,6	19,9	19,0	16,9	16,2	13,0	15,8	17,4	17,2	20,6	22,9	21,6	<b>18,34</b>
PE	Correntes	20,8	20,0	18,7	16,9	14,4	14,0	13,6	15,4	19,2	20,6	22,0	21,2	<b>18,07</b>
PE	Fernando De Noronha	20,3	19,2	18,7	17,0	19,2	17,4	19,1	19,8	21,1	22,6	22,9	21,8	<b>19,93</b>
PE	Floresta	21,4	20,7	20,9	18,6	17,2	15,1	16,4	19,4	20,4	22,9	23,3	22,3	<b>19,88</b>
PE	Garanhuns	20,4	20,0	19,4	16,8	16,2	14,1	15,0	17,6	18,3	21,7	22,6	21,7	<b>18,65</b>
PE	Nazaré Da Mata	20,1	19,9	19,8	17,3	16,4	14,4	15,6	17,2	19,5	21,7	22,3	21,8	<b>18,83</b>
PE	Olinda	19,9	21,4	19,8	17,6	17,6	15,2	17,5	18,8	19,8	22,8	23,9	22,6	<b>19,74</b>
PE	Ouricuri	19,9	18,1	19,8	18,0	17,3	16,1	17,5	21,2	20,5	21,7	22,4	21,1	<b>19,47</b>
PE	Petrolândia	21,1	21,1	20,5	19,2	17,8	15,9	18,2	20,0	20,4	22,5	22,6	21,3	<b>20,05</b>
PE	Petrolina	20,2	23,4	19,7	18,0	17,5	16,2	16,8	18,7	19,5	21,5	20,6	20,0	<b>19,34</b>
PE	Recife	19,8	19,5	18,4	15,8	14,6	13,7	13,9	17,1	18,7	19,6	20,6	19,7	<b>17,62</b>
PE	São Caetano	22,1	21,4	19,6	17,8	15,9	14,5	14,7	16,5	19,7	22,2	22,6	22,1	<b>19,09</b>
PE	Surubim	20,6	19,9	19,8	17,6	17,3	15,0	15,6	19,2	19,1	21,7	22,4	21,9	<b>19,18</b>
PI	Alto Parnaíba	17,4	15,5	17,5	13,4	17,4	13,2	20,4	22,0	19,7	18,7	18,7	16,2	<b>17,51</b>
PI	Amarante	19,3	18,9	18,2	18,3	18,6	18,7	19,7	21,7	22,4	22,2	21,3	19,9	<b>19,93</b>
PI	Barras	19,1	18,6	17,9	18,0	18,6	18,9	20,0	22,1	22,7	22,4	21,3	19,8	<b>19,95</b>
PI	Bom Jesus Do Piauí	19,4	20,9	20,2	19,9	19,7	18,8	19,7	22,2	22,4	21,8	22,4	20,6	<b>20,67</b>
PI	Caracol	19,6	18,5	19,8	18,5	17,8	17,6	19,1	22,0	21,5	20,6	21,4	19,7	<b>19,68</b>
PI	Floriano	19,1	19,9	18,4	19,4	19,1	18,6	20,3	22,3	20,3	21,7	21,9	19,6	<b>20,05</b>
PI	Jaicós	19,5	19,1	18,2	17,8	17,7	17,2	18,3	20,2	21,3	21,7	21,2	19,9	<b>19,34</b>
PI	Luís Correia	19,0	18,3	17,6	17,6	17,9	18,2	19,4	21,5	22,3	22,3	21,1	19,8	<b>19,58</b>
PI	Morro Dos Cavalos	19,8	19,1	17,7	18,5	17,1	17,3	18,5	21,0	23,4	23,0	20,2	20,1	<b>19,64</b>
PI	Parnaíba	18,3	18,0	18,0	17,2	18,3	18,9	21,0	23,2	23,3	24,4	23,8	21,2	<b>20,47</b>
PI	Paulistana	18,0	18,8	20,1	18,3	19,3	18,2	19,8	17,4	18,0	22,8	22,0	20,7	<b>19,45</b>
PI	Picos	17,9	17,6	18,7	18,4	18,9	18,5	17,4	22,8	21,9	22,7	21,9	20,5	<b>19,77</b>
PI	Piripiri	19,3	18,9	19,1	18,4	19,8	18,5	20,0	21,9	22,1	23,4	23,0	18,9	<b>20,28</b>
PI	Porto	19,0	18,6	17,9	18,1	18,5	19,0	20,1	22,2	22,7	22,4	21,3	19,9	<b>19,98</b>
PI	São João Do Piauí	19,2	18,1	19,0	18,2	17,2	16,3	19,3	22,5	22,9	22,1	21,7	19,6	<b>19,68</b>
PI	Simplício Mendes	19,6	19,4	18,6	18,2	18,2	18,1	19,0	20,6	21,0	21,3	20,7	19,2	<b>19,49</b>
PI	Teresina	18,0	17,5	17,2	17,0	18,0	19,0	21,9	23,6	22,0	23,0	20,4	19,4	<b>19,75</b>

UF	CIDADE	Radiação Solar Global Diária (MJ/m <sup>2</sup> )												Média
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
PI	Uruçuí	17,9	17,6	17,6	17,7	18,2	19,7	21,3	19,7	21,2	20,8	19,6	18,6	<b>19,16</b>
RJ	Angra Dos Reis	19,6	19,2	17,3	13,7	13,1	11,0	12,6	13,3	14,2	16,3	17,3	18,2	<b>15,48</b>
RJ	Alto De Itatiaia	18,2	17,2	16,7	15,8	14,3	13,6	13,8	16,4	16,9	17,8	20,4	21,3	<b>16,87</b>
RJ	Bangú	20,2	20,2	17,9	15,2	12,8	11,9	12,3	14,3	15,2	16,9	18,7	19,0	<b>16,22</b>
RJ	Cabo Frio	23,3	22,5	20,7	17,3	14,6	13,8	14,0	15,6	16,0	17,8	20,4	21,3	<b>18,11</b>
RJ	Campos	22,3	21,5	19,6	15,7	14,8	12,8	14,2	15,4	15,4	16,8	19,0	20,6	<b>17,34</b>
RJ	Carmo	22,3	20,2	18,5	15,4	13,4	12,3	13,0	15,2	15,7	17,3	18,7	18,5	<b>16,71</b>
RJ	Cordeiro	20,7	20,0	17,8	14,8	13,6	11,9	13,5	15,3	14,6	16,4	17,3	18,5	<b>16,20</b>
RJ	Ilha Guaíba	20,0	19,6	17,7	14,6	13,9	11,9	13,9	14,2	14,8	17,1	18,2	19,0	<b>16,24</b>
RJ	Itaperuna	21,8	21,2	19,0	15,8	14,4	12,7	13,5	16,1	15,4	17,5	18,9	21,0	<b>17,28</b>
RJ	Macaé	22,2	21,5	19,2	16,7	14,3	12,5	14,6	16,0	15,2	17,5	19,4	19,8	<b>17,41</b>
RJ	Niterói	19,2	18,8	18,4	15,2	12,3	10,5	11,6	14,5	18,3	17,1	20,2	19,9	<b>16,33</b>
RJ	Nova Friburgo	18,7	17,8	17,0	14,4	14,0	11,1	12,6	14,9	14,6	14,8	16,5	19,4	<b>15,48</b>
RJ	Petrópolis	21,1	20,3	18,2	15,5	13,8	13,3	13,8	15,6	15,4	17,1	17,9	18,2	<b>16,68</b>
RJ	Pinheiral	19,5	18,5	17,8	14,1	13,0	12,0	13,0	14,3	15,2	17,1	19,4	19,0	<b>16,08</b>
RJ	Piraí	19,5	19,6	17,4	14,1	12,7	11,1	13,0	13,7	14,6	17,1	17,8	18,1	<b>15,73</b>
RJ	Resende	19,5	19,3	17,4	14,4	13,5	11,8	13,8	14,6	15,2	17,1	18,2	19,0	<b>16,15</b>
RJ	Rio De Janeiro	21,1	20,4	18,8	14,6	13,8	11,6	13,6	14,6	15,2	17,5	19,0	20,2	<b>16,70</b>
RJ	São Fidélis	21,8	21,5	19,3	15,4	13,5	12,1	13,8	16,0	15,7	17,5	19,4	19,7	<b>17,14</b>
RJ	Teresópolis	19,1	17,8	16,7	13,8	12,7	11,4	12,6	14,3	14,6	15,0	17,3	18,1	<b>15,28</b>
RJ	Vassouras	20,3	20,4	18,5	14,9	13,8	12,0	13,8	14,9	14,9	17,5	18,6	19,8	<b>16,62</b>
RN	Alexandria	20,0	19,5	18,6	17,7	16,8	15,8	16,9	19,3	21,1	21,6	21,8	21,1	<b>19,18</b>
RN	Anjos	21,0	21,2	20,0	18,3	17,0	15,1	16,3	18,6	20,8	22,0	22,6	22,3	<b>19,60</b>
RN	Areia Branca	20,3	19,2	18,1	17,3	17,0	16,3	17,5	20,0	21,5	22,4	22,0	21,4	<b>19,42</b>
RN	Caraúba	19,9	19,4	18,6	17,6	17,0	16,0	17,3	19,5	21,3	21,8	21,8	21,1	<b>19,28</b>
RN	Caicó	20,9	21,1	20,0	18,4	17,3	15,1	16,4	18,6	20,9	21,6	22,6	22,1	<b>19,58</b>
RN	Ceará Mirim	20,5	20,1	19,1	18,3	18,2	15,5	16,8	20,0	21,0	22,7	23,1	22,1	<b>19,78</b>
RN	Cruzeta	20,3	20,1	19,8	18,5	18,6	17,1	17,8	21,2	21,6	23,5	23,3	21,6	<b>20,28</b>
RN	Florânia	19,5	18,7	19,1	18,2	17,4	16,6	17,6	20,9	21,3	22,7	22,1	20,7	<b>19,57</b>
RN	Macau	19,4	19,3	18,3	18,0	18,3	16,5	17,9	20,8	21,4	23,0	22,3	20,9	<b>19,68</b>
RN	Mossoró	19,4	19,3	18,3	17,3	18,0	16,8	18,2	21,2	21,7	23,0	23,0	21,3	<b>19,79</b>
RN	Natal	21,4	20,9	20,6	17,8	18,4	16,3	18,0	20,2	20,2	23,8	24,0	23,0	<b>20,38</b>
RN	Santa Cruz (Rn)	21,3	21,3	20,0	18,2	16,7	14,8	16,0	18,1	20,6	22,0	22,8	22,4	<b>19,52</b>
RS	Alegrete	23,0	22,0	18,0	13,8	10,5	8,5	9,3	11,8	14,7	18,2	21,9	23,8	<b>16,29</b>
RS	Bagé	23,9	19,7	17,3	13,4	11,3	8,1	8,9	11,7	12,4	18,1	21,0	23,8	<b>15,80</b>
RS	Bom Jesus	19,0	20,9	17,3	14,7	11,0	9,2	10,5	12,0	15,8	19,4	22,1	22,9	<b>16,23</b>
RS	Caxias Do Sul	23,5	21,7	19,4	15,5	12,3	10,2	11,6	14,3	15,2	19,2	24,1	24,7	<b>17,64</b>
RS	Cachoeirinha	21,7	19,9	17,3	13,3	9,9	8,3	8,6	9,9	13,6	17,1	20,6	21,9	<b>15,18</b>
RS	Cruz Alta	21,1	20,6	17,7	15,1	11,4	9,5	10,6	12,1	15,3	19,4	22,1	24,2	<b>16,59</b>
RS	Dom. Petrolini	26,2	23,2	18,9	15,0	11,8	8,7	8,8	11,4	13,7	18,9	22,9	25,5	<b>17,08</b>
RS	Encruzilhada Do Sul	25,9	21,6	18,8	14,5	12,8	9,8	10,2	12,1	12,4	18,7	22,2	24,1	<b>16,93</b>
RS	Erexim	19,5	19,9	16,4	14,1	11,6	9,5	10,3	11,7	14,0	17,3	19,5	21,3	<b>15,43</b>
RS	Farroupilha	23,1	18,9	16,4	12,1	10,5	9,0	9,7	9,6	11,7	17,3	19,2	20,2	<b>14,81</b>
RS	Guaíba	20,4	20,0	16,9	13,1	10,1	8,5	8,8	10,5	13,5	17,1	20,0	21,3	<b>15,02</b>
RS	Ijuí	27,7	20,8	20,5	15,2	12,7	11,6	10,1	11,5	13,3	22,2	22,9	25,2	<b>17,81</b>
RS	Iraí	19,5	18,4	16,2	13,0	10,1	8,2	9,3	11,5	12,9	16,4	19,0	20,9	<b>14,62</b>
RS	Jaguarão	20,8	18,9	15,8	12,4	9,5	7,5	7,6	9,5	12,5	16,5	19,3	21,2	<b>14,29</b>
RS	Júlio Castilhos	18,9	20,4	14,8	11,6	9,1	8,2	8,5	9,6	11,1	15,1	18,8	19,3	<b>13,78</b>
RS	Marcelino Ramos	23,2	21,5	19,7	14,5	11,1	10,0	10,5	12,3	15,8	19,5	20,5	24,1	<b>16,89</b>
RS	Osório	20,9	17,8	17,2	13,3	12,7	10,0	10,1	11,2	11,0	16,6	18,8	20,8	<b>15,03</b>
RS	Panambi	21,1	21,0	18,7	15,1	12,1	9,5	10,2	12,1	15,6	19,8	22,1	22,9	<b>16,68</b>

UF	CIDADE	Radiação Solar Global Diária (MJ/m <sup>2</sup> )												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
RS	Passo Fundo	25,1	22,3	20,5	15,9	12,1	10,2	11,8	13,6	15,1	19,7	24,5	26,4	<b>18,10</b>
RS	Pelotas	20,9	17,5	15,8	12,6	10,7	8,2	8,5	10,4	12,2	16,3	18,9	20,3	<b>14,36</b>
RS	Porto Alegre	21,5	19,3	17,3	12,9	10,7	8,5	9,5	11,4	12,4	17,8	20,6	23,3	<b>15,43</b>
RS	Quaraí	19,4	15,8	13,1	10,0	8,2	8,7	10,9	14,0	16,8	19,8	21,1	19,4	<b>14,77</b>
RS	Rio Grande	23,3	21,2	17,6	14,6	10,8	8,7	8,6	11,0	14,0	18,6	20,7	23,8	<b>16,08</b>
RS	Santa Maria	19,9	18,0	15,3	12,7	9,9	7,9	8,3	9,8	12,6	17,0	19,1	20,3	<b>14,23</b>
RS	Santana Do Livramento	21,2	19,3	16,6	14,2	10,9	8,8	9,5	12,0	14,8	18,8	22,9	24,4	<b>16,12</b>
RS	Santa Rosa	19,4	17,9	15,6	12,4	9,8	8,1	8,2	9,5	12,3	15,4	17,1	18,7	<b>13,70</b>
RS	Santa Vitória Do Palmar	21,6	22,0	15,9	12,4	9,0	7,2	7,8	10,3	13,1	16,9	20,6	22,1	<b>14,91</b>
RS	São Luiz Gonzaga	23,3	21,6	18,4	14,4	11,6	9,6	10,8	13,0	16,1	20,4	22,6	23,3	<b>17,09</b>
RS	Santo Augusto	20,5	19,3	16,4	13,7	10,7	9,0	9,5	10,8	14,1	17,6	20,0	20,9	<b>15,21</b>
RS	São Borja	21,4	19,2	17,1	13,6	11,5	8,9	9,6	11,2	13,6	17,3	20,1	21,0	<b>15,38</b>
RS	São Gabriel	22,1	18,0	16,1	13,4	10,6	8,3	9,1	12,1	13,7	18,4	19,6	22,2	<b>15,30</b>
RS	Taquari	22,3	18,9	14,7	11,0	10,0	7,7	8,4	8,3	9,8	16,1	18,4	20,2	<b>13,82</b>
RS	Torres	19,9	18,7	16,5	14,8	12,0	9,4	10,8	12,6	14,2	17,8	20,4	21,6	<b>15,73</b>
RS	Tramandaí	23,3	19,3	17,3	13,1	11,4	9,1	9,3	11,2	11,2	17,8	20,6	22,8	<b>15,53</b>
RS	Uruguaiana	22,7	19,6	16,6	11,8	10,5	9,4	9,2	10,5	13,2	18,3	20,1	21,5	<b>15,28</b>
RS	Vacaria	20,5	19,1	16,6	14,3	11,1	9,3	10,0	11,2	13,9	17,6	19,6	21,7	<b>15,41</b>
RS	Veranópolis	22,7	21,2	21,7	14,3	12,1	10,3	11,2	12,3	13,6	19,1	22,5	22,7	<b>16,98</b>
RS	Viamão	19,2	16,9	15,2	11,7	9,2	7,7	8,1	9,4	12,5	16,1	17,9	19,8	<b>13,64</b>
RO	Porto Velho	15,8	16,2	16,8	15,8	16,8	17,2	17,6	18,4	18,1	17,0	17,9	15,2	<b>16,90</b>
RO	Rondônia	16,3	16,3	16,8	16,0	16,1	15,6	19,3	19,4	17,9	18,4	17,2	16,3	<b>17,13</b>
RO	Vilhena	16,7	16,1	17,5	16,0	15,8	16,0	18,8	19,1	18,2	18,3	17,6	16,5	<b>17,22</b>
RR	Boa Vista	17,9	18,0	17,1	16,2	16,5	14,4	17,3	17,8	20,1	20,7	19,7	18,1	<b>17,82</b>
SC	Araranguá	21,0	18,8	15,5	13,2	10,4	12,8	10,0	11,5	13,6	17,4	19,2	21,3	<b>15,39</b>
SC	Blumenau	18,6	17,3	15,8	12,6	11,1	9,1	10,2	11,1	12,1	15,4	17,4	18,1	<b>14,07</b>
SC	Brusque	18,1	16,8	15,6	13,2	10,5	9,2	9,9	10,9	11,8	14,1	17,3	18,8	<b>13,85</b>
SC	Caçador	17,8	16,3	14,2	11,0	9,3	7,7	8,5	10,5	12,9	15,4	17,2	18,0	<b>13,23</b>
SC	Camboriú	17,4	17,7	14,8	13,5	11,6	9,3	10,6	10,9	11,5	15,4	18,7	18,0	<b>14,12</b>
SC	Campo Alegre	19,0	18,2	15,1	12,5	10,9	10,5	11,0	13,3	14,3	17,0	19,2	19,3	<b>15,03</b>
SC	Campos Novos	20,2	21,4	17,8	15,0	12,8	10,1	10,9	13,2	15,8	19,5	22,0	22,8	<b>16,79</b>
SC	Chapecó	20,6	21,1	18,2	15,7	13,0	10,7	12,0	13,5	15,2	20,3	22,5	23,6	<b>17,20</b>
SC	Curitibanos	22,2	20,6	17,5	14,3	11,8	10,4	11,6	13,9	11,9	19,5	22,2	24,3	<b>16,68</b>
SC	Herval Doeste	22,4	21,3	19,2	14,9	11,8	9,9	11,5	13,5	15,4	19,3	23,0	23,2	<b>17,12</b>
SC	Florianópolis	20,0	18,7	16,7	13,8	11,3	9,9	10,5	12,5	13,9	16,2	18,9	20,6	<b>15,25</b>
SC	Imbituba	21,8	19,6	16,9	13,7	11,0	9,4	11,2	12,5	14,9	17,4	22,5	22,2	<b>16,09</b>
SC	Indaial	18,6	18,4	16,2	14,0	11,6	10,0	10,8	11,9	12,8	16,5	19,6	18,9	<b>14,94</b>
SC	Irineópolis	19,2	17,8	15,7	13,3	11,1	9,5	10,4	11,8	14,2	15,3	17,9	19,1	<b>14,61</b>
SC	Itajaí	21,4	20,5	17,7	14,0	10,5	9,0	9,6	10,9	12,5	15,6	18,4	20,4	<b>15,04</b>
SC	Ituporanga	16,8	16,7	13,9	10,1	7,8	7,5	7,1	9,0	10,7	15,5	17,6	16,7	<b>12,45</b>
SC	Lages	19,8	18,8	16,1	14,1	11,7	9,0	10,8	12,7	14,1	17,2	20,0	22,0	<b>15,53</b>
SC	Laguna	19,4	18,8	16,0	14,2	11,8	9,5	11,1	12,9	14,1	17,9	20,0	22,0	<b>15,64</b>
SC	Orleans	22,6	19,6	14,6	13,4	8,7	9,0	10,5	12,5	16,1	19,2	22,1	23,9	<b>16,02</b>
SC	Porto União	17,7	17,3	15,6	13,2	11,1	9,3	10,4	12,2	13,5	17,0	19,6	20,1	<b>14,75</b>
SC	Queçaba	20,5	18,4	15,5	12,3	10,4	8,8	9,7	11,8	13,6	17,0	20,0	20,9	<b>14,91</b>
SC	São Francisco Do Sul	18,5	17,7	16,2	13,7	11,1	9,7	10,8	11,4	12,8	16,5	18,7	20,2	<b>14,78</b>
SC	São Joaquim	17,4	16,5	15,3	12,9	11,2	11,6	10,2	10,8	13,2	17,2	18,3	19,0	<b>14,47</b>
SC	São Miguel Doeste	20,6	19,9	17,6	15,3	12,7	10,7	11,6	13,4	14,4	19,9	23,7	22,3	<b>16,84</b>
SC	Urubici	22,6	21,2	17,5	14,2	11,3	10,6	12,0	13,6	15,8	19,6	22,5	23,9	<b>17,07</b>
SC	Urussanga	19,1	20,8	16,8	8,4	8,8	8,0	7,1	11,1	13,4	18,7	21,6	22,3	<b>14,68</b>
SC	Videira	20,0	19,0	17,3	13,8	11,7	11,0	11,6	13,2	14,7	17,7	19,9	20,7	<b>15,88</b>

UF	CIDADE	Radiação Solar Global Diária (MJ/m <sup>2</sup> )												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
SC	Xanxerê	19,8	19,6	18,2	15,1	12,7	9,3	11,8	13,0	16,5	19,2	21,6	21,9	<b>16,56</b>
SP	Araçatuba	21,0	20,0	19,7	17,6	15,8	13,9	15,5	17,3	17,4	21,0	21,0	20,5	<b>18,39</b>
SP	Ataliba Leonel	15,5	15,2	14,5	13,3	11,8	11,5	11,8	12,2	13,1	15,0	16,2	15,3	<b>13,78</b>
SP	Atibaia	15,8	15,7	15,4	13,2	10,5	9,0	10,2	12,1	13,6	15,2	16,3	15,2	<b>13,52</b>
SP	Bandeirantes	21,5	19,0	17,8	15,5	13,4	12,5	13,2	15,3	15,7	17,1	18,7	18,6	<b>16,53</b>
SP	Bariri	21,8	22,7	20,8	18,4	15,4	14,1	15,3	17,2	17,7	21,9	23,1	20,9	<b>19,11</b>
SP	Barra Bonita	15,7	15,4	15,0	12,9	10,2	8,4	9,3	11,1	12,6	15,2	16,3	14,8	<b>13,08</b>
SP	Barretos	20,1	20,4	20,1	16,0	15,4	14,7	16,0	17,4	17,4	21,0	20,9	19,6	<b>18,25</b>
SP	Bauru	21,5	19,6	19,5	17,0	15,3	13,3	15,3	16,6	16,8	20,5	21,5	21,1	<b>18,17</b>
SP	Botucatu	21,4	21,4	20,3	17,9	14,9	14,0	14,9	17,2	17,8	21,8	21,9	21,1	<b>18,72</b>
SP	Campinas	19,2	20,0	18,8	16,3	14,6	12,8	15,1	16,5	17,1	20,1	21,1	19,9	<b>17,63</b>
SP	Campinhua	15,1	16,1	15,2	13,1	10,8	9,4	9,9	11,8	12,8	14,9	16,2	14,9	<b>13,35</b>
SP	Campos Do Jordão	17,0	16,2	17,0	16,4	13,6	12,7	13,1	15,7	16,4	15,7	16,9	16,3	<b>15,58</b>
SP	Cananéia	18,1	17,0	15,7	12,8	11,8	10,0	11,1	12,4	12,0	15,5	17,8	17,1	<b>14,28</b>
SP	Casa Grande	14,8	14,8	13,5	10,5	9,3	7,7	8,7	9,8	10,5	11,7	13,3	13,0	<b>11,47</b>
SP	Cássia Dos Coqueiros	20,9	20,6	20,5	19,1	16,0	14,6	15,4	18,4	19,7	20,9	21,5	21,3	<b>19,08</b>
SP	Catanduva	19,8	20,8	19,3	16,7	15,5	14,1	16,3	17,3	17,4	21,0	21,4	19,7	<b>18,28</b>
SP	Colina	17,4	16,7	16,4	14,9	12,1	10,5	11,0	13,1	14,4	15,5	17,9	16,7	<b>14,72</b>
SP	Franca	19,4	19,6	19,4	16,6	15,1	14,4	16,2	17,4	17,4	21,0	19,7	18,8	<b>17,92</b>
SP	Graminha	16,7	17,1	16,2	15,0	13,0	11,0	12,1	14,6	15,0	16,1	16,8	16,0	<b>14,97</b>
SP	Ibitinga	22,0	23,1	21,3	19,0	15,9	14,9	15,8	17,7	18,2	22,1	23,3	21,0	<b>19,53</b>
SP	Iguape	18,4	17,7	16,4	13,4	11,7	9,9	10,8	11,6	12,1	15,5	17,8	18,7	<b>14,50</b>
SP	Itapetininga	19,6	18,4	18,4	16,0	14,2	11,9	13,5	15,2	15,7	18,2	21,1	21,6	<b>16,98</b>
SP	Itapeva	19,2	18,8	17,9	15,6	13,6	11,3	13,6	14,5	15,7	19,3	20,7	20,0	<b>16,68</b>
SP	Itararé	20,4	20,4	18,3	17,4	14,5	12,5	12,6	15,6	17,3	19,4	20,0	19,1	<b>17,29</b>
SP	Jaboticabal	21,0	22,8	20,2	18,5	16,1	14,8	16,2	17,5	18,2	21,1	22,4	20,7	<b>19,13</b>
SP	Jaú	22,1	22,0	21,0	19,5	16,5	14,9	16,0	18,3	19,5	21,4	23,4	21,7	<b>19,69</b>
SP	Jurumirim	21,1	21,7	20,5	17,5	14,1	12,8	13,6	16,1	17,0	21,1	22,4	20,6	<b>18,21</b>
SP	Juquiá	12,7	12,5	10,9	8,9	7,2	6,1	6,4	7,6	8,7	10,4	13,6	11,4	<b>9,70</b>
SP	Limeira	21,2	21,2	20,0	18,2	14,9	13,5	14,5	16,9	18,6	20,6	22,1	20,5	<b>18,52</b>
SP	Limoeiro	16,1	16,4	14,8	13,2	10,9	9,1	10,0	12,3	13,4	15,4	16,0	16,9	<b>13,71</b>
SP	Lins	18,6	20,4	20,0	16,9	15,6	13,4	15,1	16,6	17,3	21,0	21,8	20,2	<b>18,08</b>
SP	Mococa	21,5	21,5	21,2	19,5	16,6	15,2	16,2	18,4	20,2	21,1	22,5	21,2	<b>19,59</b>
SP	Monte Alegre Do Sul	21,6	19,8	19,5	17,7	15,0	13,9	14,6	17,3	17,9	19,3	23,0	22,6	<b>18,52</b>
SP	Nova Odessa	22,4	22,4	20,8	18,9	15,6	13,9	15,3	17,5	18,9	21,9	21,4	21,4	<b>19,20</b>
SP	Parquera Açu	19,5	20,2	16,9	15,0	12,5	10,6	11,0	12,0	13,2	15,4	17,8	18,7	<b>15,23</b>
SP	Pindamonhangaba	18,0	16,6	16,6	13,7	11,8	10,0	11,6	13,6	14,5	15,2	18,2	18,6	<b>14,87</b>
SP	Piracicaba	19,7	19,5	19,0	16,3	13,6	12,6	13,5	16,3	17,0	18,7	21,2	19,9	<b>17,28</b>
SP	Pindorama	17,1	16,9	15,8	14,6	13,3	13,0	12,9	14,6	14,2	16,6	17,4	16,4	<b>15,23</b>
SP	Pirajú	16,8	16,3	15,3	13,5	10,8	9,0	9,8	11,7	13,7	15,4	17,6	16,2	<b>13,84</b>
SP	Pradópolis	21,8	22,8	21,7	18,7	15,7	15,4	16,0	18,0	18,7	22,4	22,0	21,0	<b>19,52</b>
SP	Presidente Prudente	15,4	17,2	15,5	13,4	10,9	10,0	10,6	11,8	12,3	16,0	16,5	15,2	<b>13,73</b>
SP	Ribeirão Das Antas	14,6	18,0	14,4	11,7	10,0	8,6	10,7	11,4	11,9	14,1	15,0	13,5	<b>12,83</b>
SP	Ribeirão Preto	19,3	19,2	18,5	17,1	14,7	13,7	14,6	16,9	17,5	19,7	20,7	19,2	<b>17,59</b>
SP	Salto Grande	14,8	14,4	14,0	13,2	10,6	9,2	9,9	11,3	12,2	14,5	15,7	14,3	<b>12,84</b>
SP	Santos	19,2	18,2	17,2	14,6	12,5	11,3	11,7	12,9	14,2	15,6	18,1	18,9	<b>15,37</b>
SP	São Carlos	19,5	19,5	18,9	16,5	15,2	13,3	15,2	12,4	17,2	20,2	20,2	19,4	<b>17,29</b>
SP	São José Dos Campos	18,8	17,7	17,3	14,9	13,1	11,6	13,1	15,0	15,1	17,1	19,4	19,0	<b>16,01</b>
SP	São Paulo	16,3	15,9	14,2	13,9	11,3	10,8	11,2	13,3	12,9	13,3	15,9	17,6	<b>13,88</b>
SP	São Simão	19,4	18,9	19,3	17,2	15,6	13,9	15,6	17,5	17,3	19,8	20,6	19,7	<b>17,90</b>
SP	Sorocaba	16,6	16,8	15,4	13,0	10,4	7,6	9,6	11,3	12,8	15,4	16,8	16,2	<b>13,49</b>

UF	CIDADE	Radiação Solar Global Diária (MJ/m <sup>2</sup> )												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
SP	Taubaté	18,8	18,1	17,3	14,6	13,4	11,6	13,4	14,8	15,1	17,1	19,0	19,0	<b>16,02</b>
SP	Tatuí	16,1	14,9	14,3	11,2	9,7	7,8	9,0	11,3	11,2	13,9	16,3	15,5	<b>12,60</b>
SP	Tietê	20,3	19,6	18,8	16,6	14,1	12,5	14,1	16,1	17,1	19,0	22,7	20,7	<b>17,63</b>
SP	Tremembé	18,0	17,7	17,0	14,9	13,1	11,6	13,1	15,0	15,4	16,7	19,4	18,2	<b>15,84</b>
SP	Ubatuba	17,7	17,7	16,6	13,2	12,2	10,6	13,0	13,2	14,8	15,4	17,0	18,2	<b>14,97</b>
SP	Votuporanga	19,0	22,3	19,7	17,2	15,3	13,7	16,2	17,7	17,4	21,0	21,3	20,1	<b>18,41</b>
SE	Aracajú	23,0	22,5	20,9	19,0	15,8	15,1	15,2	17,3	19,6	21,8	22,8	23,3	<b>19,69</b>
SE	Itabaianinha	19,6	19,0	18,6	15,8	15,3	13,2	15,1	16,9	17,4	20,6	20,9	20,9	<b>17,78</b>
SE	Propriá	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	<b>22,60</b>
TO	Paraná (To)	19,0	18,2	18,7	19,1	19,0	18,5	19,1	20,7	20,5	20,5	18,6	18,9	<b>19,23</b>
TO	Pedro Afonso	18,1	15,5	17,5	16,8	17,1	17,9	19,8	21,4	18,6	18,7	18,7	18,2	<b>18,19</b>
TO	Porto Nacional	19,4	18,5	17,8	20,0	19,2	20,2	19,8	21,5	22,4	19,7	20,0	18,5	<b>19,75</b>
TO	Taguatinga	22,6	21,1	19,4	20,3	18,9	18,5	18,9	20,9	21,6	21,6	20,5	19,7	<b>20,33</b>
TO	Tocantinópolis	17,6	17,1	16,7	17,6	17,9	18,7	19,5	20,6	19,8	20,0	19,5	17,9	<b>18,58</b>
PB	Areia	21,3	21,7	21,1	20,3	16,9	15,1	15,1	18,2	19,8	20,7	21,6	19,6	<b>19,28</b>
PR	Paranaguá	17,0	16,2	14,7	12,3	10,8	9,3	9,8	10,4	10,8	12,5	15,9	16,6	<b>13,03</b>
RO	Porto Velho	14,8	14,8	16,4	15,1	15,8	16,5	18,5	18,0	17,2	17,1	16,7	15,9	<b>16,40</b>
TO	Peixe	18,9	16,8	18,6	16,7	17,4	17,9	16,5	18,4	21,9	18,4	18,6	17,9	<b>18,17</b>

Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil (2003)

Tabela C.2 Radiação solar global diária (MJ/m<sup>2</sup>) – Países vizinhos

PAÍS	CIDADE	Radiação Solar Global Diária (MJ/m <sup>2</sup> )												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
ARG	Cerro Azul	21,3	18,4	18,2	13,7	12,3	9,2	10,1	12,2	14,6	17,4	19,5	21,2	<b>15,68</b>
ARG	El Sombrerito	24,0	22,0	19,9	14,8	12,0	9,6	10,9	13,0	15,2	20,4	20,5	24,1	<b>17,20</b>
ARG	Marcos Juárez	23,5	21,1	18,1	12,5	9,3	8,0	8,9	12,0	15,7	19,4	22,0	24,0	<b>16,21</b>
ARG	Mercedes	25,3	21,2	20,2	15,3	12,4	9,8	11,2	13,3	16,2	21,2	22,5	25,5	<b>17,84</b>
ARG	Oliveros	21,3	19,4	16,3	12,3	9,0	7,1	7,8	9,9	13,2	17,1	19,6	20,9	<b>14,49</b>
ARG	Paraná (Argentina)	23,7	20,6	18,1	13,6	10,6	9,2	9,8	12,4	15,7	19,8	22,6	23,9	<b>16,67</b>
ARG	Pcia R. S. Peña	23,1	21,1	18,1	13,2	10,7	9,4	10,5	12,4	16,4	19,6	20,8	23,4	<b>16,56</b>
ARG	Rafaela	24,4	21,5	18,1	13,5	10,6	8,9	9,7	12,3	16,2	20,1	22,3	24,2	<b>16,82</b>
ARG	San Miguel	23,5	21,0	16,7	11,9	8,9	7,1	7,7	10,5	14,5	17,5	21,2	23,7	<b>15,35</b>
URU	Artigas	22,0	20,2	17,9	14,2	10,7	7,9	9,6	12,5	14,1	18,0	22,7	24,1	<b>16,10</b>
URU	Cerro Largo	21,5	19,8	16,4	12,5	9,3	7,3	8,3	10,3	13,1	17,0	21,3	22,5	<b>14,90</b>
URU	Paso De Los Toros	22,0	20,0	17,1	13,8	10,3	7,8	9,2	11,9	13,8	17,4	21,8	24,0	<b>15,80</b>
URU	Paysandu	23,2	22,0	17,7	12,7	9,0	7,3	7,9	10,5	14,2	18,8	22,9	23,7	<b>15,80</b>
URU	Rivera	22,0	20,2	17,4	14,2	10,8	8,4	9,8	12,4	14,2	17,6	21,8	23,8	<b>16,10</b>
URU	Salto	23,2	22,1	17,9	13,8	10,0	7,1	8,6	11,5	14,4	18,9	23,3	23,6	<b>16,20</b>
VEN	San Carlo (Rio Negro)	13,6	13,4	13,5	12,4	12,0	11,5	12,1	14,0	15,3	14,7	14,5	13,8	<b>13,40</b>
BOL	Santa Ana	21,8	20,9	19,7	19,3	15,9	14,6	15,5	18,0	18,8	20,9	21,6	22,0	<b>19,10</b>
VEN	Santa Elena De Vairen	18,7	20,0	21,3	21,4	17,9	17,4	18,5	19,5	21,0	20,0	19,1	17,4	<b>19,40</b>
PAR	Asunción	23,0	22,2	19,3	15,8	12,3	9,9	11,2	14,0	15,9	19,4	22,8	24,2	<b>17,50</b>
PAR	Bahia Negra	21,8	20,5	18,1	12,3	10,7	13,1	13,9	15,2	18,8	21,3	19,6	16,7	<b>16,83</b>
PAR	Carapeguá	21,9	21,9	18,0	16,5	11,7	9,9	9,9	11,5	14,7	18,9	22,9	22,2	<b>16,67</b>
PAR	Concepción (Paraguai)	18,5	18,0	16,2	14,2	11,6	10,9	11,3	13,1	14,6	17,0	18,6	18,9	<b>15,24</b>
PAR	Encarnación	22,2	20,6	17,8	15,5	12,5	10,3	10,9	13,9	16,2	20,5	21,4	23,9	<b>17,14</b>
PAR	Mcal. Estigarribia	20,7	20,7	18,5	15,7	13,1	11,2	12,3	15,0	17,1	19,6	21,3	22,0	<b>17,27</b>
PAR	Nueva Asunción	17,8	16,9	16,6	14,9	12,7	11,8	13,2	14,1	15,9	16,6	18,0	17,9	<b>15,53</b>
PAR	Paso Barreto	22,7	23,2	19,1	17,2	13,5	12,3	13,3	14,0	16,6	20,8	23,4	22,7	<b>18,23</b>

PAÍS	CIDADE	Radiação Solar Global Diária (MJ/m <sup>2</sup> )												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
PAR	Prats Gill	22,3	22,0	18,4	16,1	12,6	10,1	11,7	13,9	16,8	20,5	22,0	22,3	<b>17,39</b>
PAR	Pte. Stroessner	20,9	20,7	18,1	14,9	12,2	10,3	11,4	13,5	15,6	18,3	21,4	22,3	<b>16,63</b>
PAR	S. Del Guairá	20,5	21,2	18,2	14,9	11,7	10,5	11,3	12,6	14,1	18,3	20,5	20,3	<b>16,18</b>
PAR	S. J. Bautista	23,6	22,0	17,9	15,6	12,7	11,2	11,0	14,1	16,3	20,5	22,8	23,8	<b>17,63</b>
PAR	San Lorenzo	24,2	22,7	18,9	15,9	12,7	10,7	11,6	13,6	16,0	20,4	23,3	24,6	<b>17,88</b>
PAR	Villarrica	22,7	21,9	18,6	16,4	12,6	10,4	11,5	13,7	15,9	19,4	23,3	23,0	<b>17,45</b>
PER	Iquitos	16,2	16,2	15,6	14,9	14,1	13,7	14,7	16,3	16,6	16,9	16,2	15,9	<b>15,61</b>
PER	Moyobamba	17,9	17,2	16,6	16,3	14,9	15,2	15,7	17,2	17,4	16,8	16,9	17,2	<b>16,61</b>
PER	Pucallpa	20,5	19,2	18,4	15,9	13,8	13,8	13,8	16,7	16,7	17,6	20,1	20,9	<b>17,28</b>
PER	Tingo Maria	16,2	15,5	15,9	15,9	15,2	14,5	15,3	16,9	17,3	17,2	17,4	16,4	<b>16,14</b>
SUR	Paramaribo	16,5	17,9	19,1	18,5	17,3	17,9	19,7	21,6	22,8	22,1	19,2	16,4	<b>19,10</b>
SUR	Tafelberg	15,1	16,6	17,6	17,4	17,1	17,0	18,2	20,5	21,4	21,2	18,3	16,4	<b>18,10</b>
SUR	Sipalwini	16,5	16,6	17,2	16,5	15,6	14,7	19,0	19,7	22,8	23,0	18,8	16,2	<b>18,10</b>
GFR	Camopi	16,2	17,7	18,1	17,2	16,5	17,2	19,4	20,6	23,0	22,8	19,9	16,6	<b>18,77</b>
GFR	Kourou	15,5	16,8	17,8	15,0	15,9	17,3	19,8	21,3	23,1	21,4	19,1	15,1	<b>18,18</b>
GFR	Maripasoula	16,1	16,9	17,8	19,0	16,4	16,8	18,4	20,5	21,9	21,6	19,7	16,9	<b>18,50</b>
GFR	Cayenne (Rochambeau)	15,4	16,0	17,2	17,7	16,1	16,6	18,5	20,2	21,9	21,6	19,6	16,8	<b>18,13</b>
GUI	Ebini L. S.	13,4	16,5	16,4	14,8	15,1	16,2	18,6	19,9	21,8	21,3	18,7	13,1	<b>17,15</b>
GUI	Georgetown	16,8	18,7	19,7	19,3	17,9	17,1	19,0	20,7	21,1	19,7	18,4	16,3	<b>18,73</b>
GUI	New Amsterdam	16,9	18,8	19,7	19,3	17,9	17,0	18,9	20,6	21,1	19,8	18,6	16,4	<b>18,75</b>
GUI	St. Ignatius	17,3	17,9	17,3	17,1	14,3	15,6	16,2	17,2	21,1	20,4	19,9	17,7	<b>17,67</b>
BOL	Cobija	21,8	20,1	19,3	18,0	15,9	14,6	15,3	16,7	15,8	20,5	21,8	21,3	<b>18,43</b>
BOL	Concepción (Bolívia)	17,1	17,8	16,4	14,5	13,5	14,8	15,0	15,9	15,7	16,9	17,7	19,9	<b>16,27</b>
BOL	Magdalena	20,9	20,5	19,5	18,2	15,5	14,2	14,9	16,7	18,8	19,7	20,5	20,9	<b>18,36</b>
BOL	Puerto Suárez	20,6	17,7	16,9	15,2	14,3	12,5	12,8	14,7	17,2	19,6	18,9	19,5	<b>16,66</b>
BOL	Riberalta	20,1	19,8	18,6	17,2	15,6	13,6	14,3	16,4	18,4	19,4	19,7	20,2	<b>17,78</b>
BOL	Robore	23,0	21,8	20,9	18,8	15,1	14,6	15,1	18,0	20,1	21,8	22,6	23,0	<b>19,57</b>
BOL	S. Ignacio Velasco	21,8	20,9	19,7	19,3	14,6	14,6	15,5	18,0	18,8	20,9	22,2	22,0	<b>19,03</b>
BOL	San Joaquín	20,9	20,5	19,5	18,4	15,9	14,2	14,9	17,2	18,8	20,5	20,7	20,9	<b>18,53</b>
BOL	San José	23,0	22,0	20,9	18,8	15,1	14,6	15,1	17,6	20,5	21,8	23,0	23,9	<b>19,69</b>
BOL	San Juan	22,6	21,7	20,7	18,5	15,7	14,6	14,8	17,3	19,8	21,4	22,2	23,9	<b>19,43</b>
BOL	San Julián	19,4	18,8	19,3	17,5	13,8	13,0	16,2	16,7	18,2	20,7	20,2	18,3	<b>17,68</b>
BOL	Santa Cruz (Bolívia)	22,7	21,9	21,0	18,4	15,1	14,4	15,1	16,4	18,6	20,6	21,4	22,8	<b>19,03</b>
BOL	Trinidad	17,0	16,9	16,5	16,8	14,4	15,5	17,0	18,3	15,0	19,9	21,8	17,9	<b>17,25</b>
BOL	Vallegrande	17,7	16,7	13,9	13,3	15,4	14,6	13,9	15,9	15,7	19,1	17,8	19,7	<b>16,14</b>
BOL	Yacuces	20,4	19,8	17,7	15,9	14,0	12,0	13,6	14,9	15,7	19,0	20,1	18,8	<b>16,83</b>

Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil (2003)

## ANEXO II: RESULTADOS DO MODELO PROTÓTIPO DE MANZANARES

A tabela D.1 apresenta os dados obtidos pela equipe de Manzanares em 08 de junho de 1987, e foram gentilmente cedidos por Weinrebe (2010) em carta pessoal ao autor.

Tabela D.3 Dados da planta piloto de Manzanares, Espanha (08 de junho de 1987).

n	Tempo (h)	G (W/m <sup>2</sup> )	T amb (°C)	UR (%)	U amb (m/s)	P atm (Pa)	Pot. El. (kW)	Umax (m/s)	Efic. Turb	Tmax (°C)	DeltaT (°C)
1	0:10	0,00	18,03	60,98	6,12	93167,57	2,86	2,82	0,04	20,60	2,57
2	0:20	0,00	17,87	61,60	5,29	93167,70	2,12	2,58	0,06	20,59	2,72
3	0:30	0,00	17,58	63,05	4,93	93167,81	1,97	2,52	0,06	20,30	2,72
4	0:40	0,00	17,23	64,56	4,39	93172,73	1,65	2,47	0,06	20,02	2,79
5	0:50	0,00	17,14	64,94	5,08	93179,25	0,00	3,53	0,13	19,80	2,66
6	1:00	0,00	16,94	65,86	4,90	93171,48	0,00	3,67	0,10	19,53	2,59
7	1:10	0,00	16,67	66,72	5,41	93171,52	0,00	3,66	0,06	19,12	2,45
8	1:20	0,00	16,32	67,70	5,54	93164,12	0,00	3,70	0,04	18,62	2,30
9	1:30	0,00	15,99	69,20	5,96	93154,90	0,00	3,75	0,03	18,29	2,30
10	1:40	0,00	15,81	70,58	6,54	93139,98	0,00	3,77	0,03	18,05	2,24
11	1:50	0,00	15,62	71,93	5,88	93145,00	0,00	3,64	0,03	17,84	2,22
12	2:00	0,00	15,35	73,21	4,99	93152,77	0,00	3,55	0,03	17,63	2,28
13	2:10	0,00	15,16	73,76	4,66	93157,75	0,00	3,40	0,03	17,44	2,28
14	2:20	0,00	14,98	73,90	4,38	93168,45	0,00	3,17	0,04	17,32	2,34
15	2:30	0,00	14,77	74,22	4,23	93170,91	0,00	3,13	0,04	17,12	2,35
16	2:40	0,00	14,56	74,36	4,06	93174,90	0,00	3,16	0,73	22,43	7,87
17	2:50	0,00	14,44	74,39	4,70	93170,00	0,00	3,14	0,04	16,76	2,32
18	3:00	0,00	14,18	75,62	5,40	93167,70	0,00	3,67	0,04	16,54	2,36
19	3:10	0,00	14,19	75,64	5,32	93175,50	0,00	3,79	0,05	16,75	2,56
20	3:20	0,00	14,27	75,01	5,31	93178,77	0,00	4,03	0,12	17,04	2,77
21	3:30	0,00	14,18	74,78	4,95	93180,62	0,00	3,97	0,21	17,13	2,95
22	3:40	0,00	13,98	75,65	4,69	93180,26	0,00	3,97	0,26	16,98	3,00
23	3:50	0,00	14,01	75,37	3,54	93199,50	0,00	4,21	0,59	17,12	3,11
24	4:00	0,00	14,08	74,80	3,43	93209,23	0,00	4,28	0,65	17,33	3,25
25	4:10	0,00	14,12	56,49	4,25	93215,57	0,84	3,80	0,68	17,34	3,22
26	4:20	0,00	13,88	52,99	4,15	93231,72	2,26	2,70	0,33	17,58	3,70
27	4:30	0,00	13,63	53,36	3,73	93239,73	2,19	2,72	0,27	17,27	3,64
28	4:40	0,21	13,48	53,36	3,67	93238,49	2,11	2,71	0,29	17,19	3,71
29	4:50	2,41	13,40	52,70	4,35	93231,43	2,48	2,80	0,38	17,26	3,86
30	5:00	5,49	13,21	51,12	4,49	93232,91	2,57	2,81	0,43	17,15	3,94
31	5:10	13,09	13,10	49,29	4,22	93238,65	2,83	2,90	0,49	17,19	4,09
32	5:20	16,83	13,02	48,71	3,84	93246,85	2,91	2,91	0,52	17,20	4,18
33	5:30	28,70	13,02	49,32	3,56	93239,75	3,32	3,02	0,56	17,36	4,34
34	5:40	48,88	13,08	48,80	4,34	93227,84	3,33	2,99	0,59	17,48	4,40
35	5:50	71,93	13,09	47,04	5,28	93238,93	3,46	3,08	0,60	17,53	4,44
36	6:00	97,98	13,18	46,70	5,11	93238,68	4,02	3,20	0,62	17,82	4,64
37	6:10	134,37	13,25	46,70	4,60	93237,42	4,20	3,24	0,65	18,27	5,02
38	6:20	234,54	13,62	44,95	4,33	93226,70	8,18	4,13	0,70	20,14	6,52
39	6:30	128,80	13,19	44,77	4,86	93245,19	5,44	3,54	0,68	18,85	5,66
40	6:40	368,55	13,47	42,32	4,70	93245,10	7,24	3,93	0,70	19,94	6,47
41	6:50	332,78	13,66	41,31	4,34	93228,43	11,12	4,65	0,71	21,88	8,22
42	7:00	340,09	13,45	42,42	4,62	93221,52	9,47	4,36	0,71	20,66	7,21
43	7:10	382,63	13,53	42,69	4,17	93216,58	12,74	4,89	0,72	22,50	8,97

n	Tempo (h)	G (W/m <sup>2</sup> )	T amb (°C)	UR (%)	U amb (m/s)	P atm (Pa)	Pot. El. (kW)	Umax (m/s)	Efic. Turb	Tmax (°C)	DeltaT (°C)
44	7:20	381,60	13,54	42,30	4,29	93214,32	12,17	4,85	0,72	22,50	8,96
45	7:30	309,37	13,74	42,02	4,10	93211,95	12,54	4,86	0,72	22,62	8,88
46	7:40	430,30	14,01	41,23	3,64	93209,38	13,18	5,04	0,72	23,27	9,26
47	7:50	548,75	14,34	39,79	3,90	93191,88	20,44	5,79	0,73	25,88	11,54
48	8:00	525,56	14,46	39,46	3,75	93178,39	20,31	5,75	0,73	26,20	11,74
49	8:10	422,37	14,28	39,69	2,67	93169,48	18,42	5,53	0,72	25,24	10,96
50	8:20	423,26	14,68	38,98	3,24	93160,55	18,38	5,58	0,72	25,29	10,61
51	8:30	677,68	15,06	37,13	3,32	93147,13	23,84	6,16	0,73	27,73	12,67
52	8:40	664,81	15,09	35,69	3,17	93134,30	24,53	6,29	0,73	28,15	13,06
53	8:50	739,03	15,44	34,60	2,95	93111,93	28,26	6,66	0,73	29,85	14,41
54	9:00	763,08	15,60	36,16	3,13	93094,42	30,06	6,84	0,73	30,68	15,08
55	9:10	792,48	15,81	33,85	2,91	93076,74	31,75	6,95	0,73	31,52	15,71
56	9:20	814,46	15,81	32,44	1,23	93063,42	33,23	7,06	0,73	32,27	16,46
57	9:30	837,79	16,36	31,16	2,48	93042,37	35,03	7,23	0,73	33,26	16,90
58	9:40	863,19	16,56	30,90	3,31	93031,73	37,36	7,40	0,73	33,85	17,29
59	9:50	885,23	16,63	31,82	3,47	93014,10	38,84	7,43	0,73	34,35	17,72
60	10:00	905,72	16,58	31,87	1,76	92997,41	39,86	7,59	0,73	34,99	18,41
61	10:10	924,49	17,16	31,20	2,17	92965,43	41,23	7,63	0,73	35,73	18,57
62	10:20	953,76	17,65	30,50	3,00	92949,25	43,30	7,78	0,73	36,80	19,15
63	10:30	923,49	17,94	31,97	3,20	92928,38	46,34	7,98	0,73	38,16	20,22
64	10:40	865,55	17,95	31,90	5,67	92927,77	34,28	7,02	0,73	34,81	16,86
65	10:50	979,28	17,91	28,42	3,68	92892,55	47,82	8,05	0,74	38,75	20,84
66	11:00	947,52	18,02	30,21	5,14	92898,32	40,09	7,46	0,73	36,53	18,51
67	11:10	1022,71	18,22	27,45	4,70	92880,71	45,98	8,01	0,74	38,84	20,62
68	11:20	1017,00	18,43	25,08	4,64	92856,37	48,39	8,05	0,74	39,15	20,72
69	11:30	1014,68	18,63	23,00	4,79	92854,85	47,20	8,03	0,74	39,46	20,83
70	11:40	1017,85	18,77	22,41	4,25	92838,81	47,20	8,05	0,74	39,75	20,98
71	11:50	1024,17	19,01	22,23	5,47	92829,05	47,17	8,00	0,74	39,91	20,90
72	12:00	1026,17	18,87	21,03	5,31	92806,56	47,77	8,07	0,74	40,05	21,18
73	12:10	1017,68	19,14	20,82	5,02	92789,72	47,85	8,10	0,74	39,80	20,66
74	12:20	1024,78	19,51	21,30	7,28	92771,12	45,06	7,87	0,74	40,16	20,65
75	12:30	979,80	19,20	23,81	5,91	92771,70	43,05	7,73	0,74	39,45	20,25
76	12:40	888,10	19,07	23,62	4,86	92753,93	41,56	7,63	0,74	38,35	19,28
77	12:50	1032,13	19,51	22,18	6,38	92743,22	45,48	7,84	0,74	40,12	20,61
78	13:00	737,66	18,96	23,93	3,79	92739,66	40,45	7,46	0,73	37,47	18,51
79	13:10	940,78	19,69	22,38	5,84	92733,55	39,59	7,55	0,74	38,41	18,72
80	13:20	832,63	19,78	21,50	5,63	92716,59	39,74	7,45	0,73	37,98	18,20
81	13:30	997,16	20,09	20,85	6,27	92719,85	41,42	7,65	0,74	40,15	20,06
82	13:40	855,02	20,11	20,67	6,26	92709,82	41,30	7,62	0,74	39,79	19,68
83	13:50	817,12	19,77	22,63	5,52	92709,13	31,71	6,82	0,73	36,09	16,32
84	14:00	731,77	20,15	21,98	6,29	92693,13	34,31	6,97	0,73	37,57	17,42
85	14:10	686,76	20,25	21,34	5,96	92676,38	36,85	7,31	0,73	37,12	16,87
86	14:20	543,62	19,61	22,60	4,14	92703,07	20,96	5,93	0,73	32,05	12,44
87	14:30	945,83	20,64	20,33	6,03	92670,50	39,09	7,48	0,74	39,57	18,93
88	14:40	901,13	20,54	20,20	6,05	92663,78	37,58	7,38	0,74	39,25	18,71
89	14:50	878,06	21,06	18,70	6,64	92652,78	36,03	7,24	0,74	39,36	18,30
90	15:00	513,33	20,35	19,95	5,93	92664,69	23,97	6,22	0,73	34,09	13,74
91	15:10	550,82	20,75	19,33	7,64	92653,78	24,49	6,28	0,73	35,17	14,42
92	15:20	799,23	20,93	20,00	7,10	92658,35	26,67	6,46	0,74	36,59	15,66
93	15:30	730,29	20,92	20,61	6,37	92643,85	30,17	6,78	0,73	37,08	16,16
94	15:40	588,69	20,75	20,11	6,47	92653,13	23,69	6,11	0,73	34,87	14,12
95	15:50	698,38	21,36	19,00	8,29	92636,47	27,42	6,51	0,73	36,22	14,86

n	Tempo (h)	G (W/m <sup>2</sup> )	T amb (°C)	UR (%)	U amb (m/s)	P atm (Pa)	Pot. El. (kW)	Umax (m/s)	Efic. Turb	Tmax (°C)	DeltaT (°C)
96	16:00	647,05	21,25	19,31	8,14	92642,50	23,97	6,17	0,73	35,24	13,99
97	16:10	617,14	21,18	19,13	7,32	92635,91	23,69	6,16	0,73	34,77	13,59
98	16:20	561,77	21,15	18,45	6,98	92626,88	22,27	5,97	0,73	33,92	12,77
99	16:30	582,94	21,21	19,14	7,89	92624,45	20,39	5,82	0,73	34,00	12,79
100	16:40	527,19	20,86	20,07	7,14	92624,10	19,38	5,78	0,73	33,62	12,76
101	16:50	484,02	20,92	19,96	7,59	92620,53	16,37	5,61	0,73	32,73	11,81
102	17:00	407,09	20,77	20,51	7,77	92627,98	12,57	5,05	0,73	30,99	10,22
103	17:10	398,85	20,73	20,11	7,74	92631,15	12,27	5,00	0,73	30,54	9,81
104	17:20	390,34	20,89	20,28	8,26	92640,65	11,87	4,87	0,73	30,30	9,41
105	17:30	313,77	20,53	20,41	7,78	92655,37	10,59	4,56	0,72	29,51	8,98
106	17:40	293,99	20,63	20,47	7,73	92666,54	10,29	4,53	0,71	28,89	8,26
107	17:50	282,69	20,50	21,11	7,42	92687,09	9,68	4,45	0,71	28,40	7,90
108	18:00	180,58	20,25	21,35	7,95	92698,57	8,70	4,17	0,70	27,34	7,09
109	18:10	164,35	19,91	22,02	7,26	92711,59	6,97	3,81	0,68	25,82	5,91
110	18:20	176,63	20,01	22,03	7,44	92723,45	7,52	3,93	0,69	26,32	6,31
111	18:30	124,93	19,89	22,48	7,26	92740,66	6,95	3,87	0,68	25,77	5,88
112	18:40	55,93	19,62	23,00	7,54	92754,60	6,07	3,63	0,66	24,99	5,37
113	18:50	45,96	19,39	23,24	7,83	92771,97	5,24	3,50	0,63	24,40	5,01
114	19:00	32,48	19,18	23,36	7,70	92787,95	4,78	3,36	0,56	23,75	4,57
115	19:10	16,87	18,88	24,14	7,70	92804,63	4,18	3,22	0,35	22,95	4,07
116	19:20	6,64	18,48	24,89	7,52	92816,09	4,11	3,18	0,16	22,10	3,62
117	19:30	1,08	18,16	25,29	7,93	92824,38	4,25	3,24	0,11	21,53	3,37
118	19:40	0,00	17,82	25,96	7,00	92834,68	4,11	3,17	0,09	21,04	3,22
119	19:50	0,00	17,56	26,29	6,19	92847,62	3,88	3,12	0,08	20,73	3,17
120	20:00	0,00	17,36	26,77	6,71	92862,75	4,10	3,18	0,07	20,49	3,13
121	20:10	0,00	17,21	26,96	6,46	92875,59	4,33	3,26	0,07	20,40	3,19
122	20:20	0,00	17,03	27,27	6,43	92889,98	4,20	3,19	0,07	20,17	3,14
123	20:30	0,00	16,76	27,69	6,17	92905,78	3,65	3,08	0,07	19,87	3,11
124	20:40	0,00	16,52	28,12	5,73	92917,95	3,72	3,09	0,06	19,58	3,06
125	20:50	0,00	16,28	28,53	5,34	92929,62	3,61	3,05	0,07	19,46	3,18
126	21:00	0,00	15,85	29,35	5,01	92937,40	3,34	2,96	0,05	18,88	3,03
127	21:10	0,00	15,42	30,05	4,51	92946,82	3,13	2,88	0,04	18,33	2,91
128	21:20	0,00	15,19	30,43	4,61	92961,16	3,15	2,92	0,04	18,20	3,01
129	21:30	0,00	15,09	30,72	4,46	92973,91	3,31	2,97	0,06	18,52	3,43
130	21:40	0,00	14,98	31,05	4,52	92983,97	3,09	2,89	0,06	18,49	3,51
131	21:50	0,00	14,82	31,60	4,40	92991,66	3,05	2,87	0,06	18,32	3,50
132	22:00	0,00	14,74	31,81	4,42	92997,41	2,55	2,75	0,08	18,37	3,63
133	22:10	0,00	14,69	31,82	3,98	93001,75	2,16	2,57	0,09	18,41	3,72
134	22:20	0,00	14,53	32,16	3,73	93002,20	2,32	2,66	0,09	18,30	3,77
135	22:30	0,00	14,42	32,33	3,68	93006,70	0,94	3,08	0,06	17,99	3,57
136	22:40	0,00	14,34	32,48	3,96	93013,65	0,00	3,37	0,08	17,50	3,16
137	22:50	0,00	14,24	32,66	3,31	93014,75	0,00	3,31	0,10	17,51	3,27
138	23:00	0,00	14,11	33,08	3,09	93019,68	0,00	3,28	0,11	17,44	3,33
139	23:10	0,00	13,90	33,74	2,87	93017,65	0,00	3,19	0,07	17,10	3,20
140	23:20	0,00	13,67	34,68	2,84	93006,22	0,00	3,25	0,06	16,83	3,16
141	23:30	0,00	13,31	35,08	2,47	93003,10	0,00	2,94	0,07	16,43	3,12
142	23:40	0,00	13,14	35,20	2,27	93003,22	0,00	3,00	0,11	16,42	3,28
143	23:50	0,00	12,82	36,29	1,92	92998,53	0,00	2,84	0,06	16,06	3,24
144	24:00	0,00	12,46	37,39	1,99	92998,79	0,00	2,66	0,04	15,60	3,14
<i>Energia gerada (kWh)</i>					→	367,25					