

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MODELAGEM DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE
ELETRICIDADE A PARTIR DE ENERGIA SOLAR
UTILIZANDO PRATOS PARABÓLICOS E MOTORES
STIRLING (DISH/STIRLING)**

Autor: **Eng. Luis Sebastian Mendoza Castellanos**
Orientador: **Prof. Dr. Vladimir Rafael Melián Cobas**
Co-orientador: **Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora**

Itajubá, Junho de 2012

M.G. - Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MODELAGEM DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE
ELETRICIDADE A PARTIR DE ENERGIA SOLAR
UTILIZANDO PRATOS PARABÓLICOS E MOTORES
STIRLING (DISH/STIRLING)**

Autor: Eng. Luis Sebastian Mendoza Castellanos

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Rafael Melián Cobas

Co-orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora

Curso: Mestrado em Engenharia Energia

Área de Concentração: Exploração do Uso Racional de Recursos Naturais e Energia

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Energia

Itajubá, Junho de 2012.

M.G – Brasil

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Rafael Melián Cobas
UNIFEI, Itajubá (MG)

Co-orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora
UNIFEI, Itajubá (MG)

Membro da banca: Prof. Dr. Marcelo José Pirani
UNIFEI, Itajubá (MG)

Membro da Banca: Prof. Dr. José Luz Silveira
UNESP, Campus de Guaratinguetá

Dedicatória

Dedico esta dissertação de mestrado a Deus e a Virgem Maria por trazer muitas bênçãos e alegrias a minha vida.

A minha avó Maria de Jesus que sempre me acompanha do céu e especialmente meu pai adotivo Carlos Julio Vargas, pois graças a ele sou quem sou (em memória).

Aos meus pais Cecília Castellanos e Jose Dolores a minha irmã Paola Mendoza Castellanos pelo amor, carinho, paciência e compreensão.

E por fim, a minha namorada Anita pelo seu amor, paciência e compreensão nesses últimos três anos, para que este trabalho pudesse ser produzido.

Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores o Prof. Dr. Electo Silva Lora e o Prof. Dr. Vladimir Rafael Melián Cobas, pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho e pela competência, dedicação, compreensão, paciência e amizade.

Agradeço a CAPES pelo incentivo dado com a bolsa durante os dois anos do curso

Aos professores o Prof. Dr. Reinaldo Guillen e o Prof. Dr. Oscar Almazan por sua amizade, colaboração e orientação.

Aos professores o Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira e o Prof. Dr. Carlos Roberto Rocha pela oportunidade de tê-los como professores em disciplinas cursadas, das quais foram fundamentais para meu enriquecimento acadêmico.

Ao meu amigo Elkin Gutierrez pela colaboração porque sempre esteve nos momentos difíceis de minha dissertação.

Aos meus amigos colombianos e meu amigo Carlos Eymel por sua amizade e colaboração, porque de alguma forma fizeram agradável minha estadia. Aos meus amigos brasileiros, Cristiane, Maria, Antonio e Tiago Rodrigo porque eles foram de grande ajuda no processo de adaptação, também pelos momentos de estudo que compartilhamos juntos durante o curso e também pelos momentos de descontração.

Ao Instituto de Engenharia de Energia da UNIFEI, representado pelos seus dedicados Professores e Funcionários, pela oportunidade que me concedeu na realização deste trabalho, e aos amigos desse Instituto, pelo convívio profissional.

Agradeço à minhas tias Julia Esperanza (Mãe adotiva), Rosário, Leonor, Alicia, por auxiliarem e investirem, novamente, na minha formação, sempre com muito amor, carinho e compreensão.

Ao NEST por possibilitar a realização deste trabalho.

Obrigado a todos!

RESUMO

MENDOZA, L. S. C. (2012), *Modelagem de sistemas de geração de eletricidade a partir de energia solar utilizando pratos parabólicos e motores Stirling (Solar Dish)*, 143p. Dissertação (Exploração do uso racional de recursos naturais e Energia- UERNE) - Instituto de Engenharia Energia, Universidade Federal de Itajubá.

Este trabalho apresenta um modelo estruturado em três etapas, que analisa o comportamento de uma tecnologia de geração de energia elétrica a partir da energia solar usando um sistema Dish/Stirling. Em primeiro lugar, é determinado o movimento característico da Terra em relação ao sol, que permite calcular os ângulos de rastreamento do sol e maximizar a temperatura no receptor aplicado a qualquer lugar geográfico do mundo. A potência elétrica do sistema foi calculada a partir de parâmetros climáticos reais como: Velocidade do vento, temperatura ambiente e Irradiação solar; fornecidos pela estação meteorológica da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI-Brasil). Dessa forma, o projeto óptico-geométrico é realizado a partir de uma modelagem que permite analisar o comportamento do sistema para diferentes dimensões geométricas e diferentes tipos de materiais nos elementos Coletor/Receptor. Finalmente, é realizado o balanço térmico, que permite avaliar a eficiência do coletor, receptor, motor Stirling e o sistema global. Os resultados obtidos a partir de simulações em MATLAB foram validados com base em resultados publicados na literatura especializada. Além disso, este trabalho resume as principais características do projeto e desempenho do Sistema pratos parabólicos e motores Stirling, identificando indicadores que servem como critérios de comparação. Também foi comparado o comportamento térmico do sistema para diferentes diâmetros e comprimentos focais do Coletor/Receptor; os resultados obtidos para uma irradiação solar de 1000 W/m^2 e diâmetros entre 1,8 a 17 m do espelho coletor, foram potências elétricas na faixa de 0,6 e 68 kWe e eficiências dos sistemas entre 22 até 31%.

Palavras chave: Coletor Solar, Conversão de Energia, Energia Solar, Irradiação solar, Máxima Eficiência, Motor Stirling.

Abstract

MENDOZA, L. S. C. (2012), *Modeling systems for generating electricity from solar energy using parabolic dishes and Stirling engines (Solar Dish)*, Itajubá, 144p. MSc. Dissertation - Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá.

This paper presents a structured model in three stages, which analyzes the behavior of a technology for generating electricity from solar energy using a Dish/Stirling system. Firstly, it is determined the characteristic movement of the Earth around the sun, which allows to calculate the tracking angles of the sun and to maximize the temperature in the receiver applied to any geographical location in the world. Electrical power was calculated from actual climatic parameters as wind speed, ambient temperature and solar irradiation, provided by the weather station of the Federal University of Itajubá (UNIFEI- Brazil). Then, the optical-geometric design is carried out through modeling that allows to analyze the behavior of this system for different geometrical dimensions and different types of materials in the collector-receiver system. Finally, it is made the modeling of the thermal behavior, which assesses the efficiencies of the collector, receiver, Stirling engine and overall system. The results obtained from MATLAB simulations were validated with results published from specialized literature. Also, this paper summarizes the main indicators that characterize the design and the performance of the Dish/Stirling Systems and provide relations that serve as new comparison criteria. Also, this paper summarizes the main indicators that characterize the design and the performance of the Dish/Stirling Systems and provide relations that serve as new comparison criteria. We also compared the thermal behavior of the system for different diameters and focal lengths of the Collector/Receiver, obtained for solar radiation of 1000 W/m^2 and diameters between 1,8 to 17 m or electric power values between 0.6 and 68 kWe and efficiency of between 22-31%.

Keywords: Solar Collector, Energy Conversion, Solar Energy, solar irradiation, Maximum Efficiency, Maximum Power, Stirling Engine.

Sumário

LISTA DE TABELAS.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	IV
SIMBOLOGIA	IX
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	2
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 RECURSO SOLAR	5
2.1.1 Radiação solar ao nível do solo	6
2.1.2 Transferência de calor em sistemas de alta temperatura	7
2.2 ÓTICA DOS CONCENTRADORES	7
2.2.1 Reflexão.....	8
2.2.2 Refração.....	8
2.2.3 Emissão de superfícies.....	9
2.2.4 Absortividade	10
2.2.5 Transmissão através de meios transparentes	11
2.3 SISTEMAS DISH/STIRLING.....	12
2.3.1 Componentes do sistema Dish/Stirling	13
2.3.2 Tecnologias de geração utilizando Dish/Stirling no mundo.....	18
2.3.3 Comparação das tecnologias solares térmicas.....	27
2.3.4 Perspectivas para tecnologias solares térmicas	27
2.4 INDICADORES TECNOLÓGICOS	33
2.4.1 Concentração geométrica	33

2.4.2	Capacidade de geração de energia elétrica por unidade de área.....	35
2.4.3	Capacidade de geração térmica por unidade de área.....	37
2.4.4	Capacidade de geração térmica versus Capacidade de geração de eletricidade.	39
2.4.5	Eficiências	40
CAPÍTULO 3. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR.....		42
3.1	GEOMETRIA SOLAR	42
3.1.1	Ângulo de declinação	42
3.1.2	Equação do Tempo	44
3.1.3	Hora solar verdadeira.....	46
3.1.4	Relação trigonométrica entre a posição do Sol e a Terra	47
3.2	IRRADIAÇÃO SOLAR NA CIDADE DE ITAJUBÁ	50
3.3	VARIAÇÃO DA IRRADIAÇÃO SOLAR EM ITAJUBÁ.....	51
CAPÍTULO 4. METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO.....		52
4.1	ESTUDO TEÓRICO DO CONCENTRADOR PARABÓLICO	52
4.2	GEOMETRIA DO PRATO PARABÓLICO	54
4.3	CÁLCULO DE DISTÂNCIAS EQUIVALENTES	57
4.4	COMPRIMENTO DE UMA PARÁBOLA	61
4.5	RECEPTOR PLANO	62
4.6	RAZÃO DE CONCENTRAÇÃO GEOMÉTRICA	64
4.7	CONCENTRAÇÃO MÁXIMA.....	65
4.8	ERROS ÓTICOS	68
4.8.1	Fator de interceptação ϕ	68
4.8.2	Imagem solar no receptor	69
4.8.3	Refletância especular	72
CAPÍTULO 5. BALANÇO TÉRMICO		73
5.1	BALANÇO DE ENERGIA NO RECEPTOR.....	73
5.1.1	Eficiência ótica de um coletor parabólico	74
5.1.2	Energia no absorvedor	75
5.1.3	Energia máxima no receptor por unidade do tempo.....	75
5.2	EFICIÊNCIA INSTANTÂNEA DO COLETOR	77
5.3	EFICIÊNCIA DO COLETOR	77
5.4	TEMPERATURA TEÓRICA NO RECEPTOR.....	78
5.5	PERDAS POR RADIAÇÃO.....	80

5.6	PERDAS POR CONVECÇÃO	81
5.7	ENERGIA ÚTIL NO COLETOR	83
5.8	DESEMPENHO DO RECEPTOR.....	83
5.9	MOTOR STIRLING	85
5.9.1	Ciclo do motor ideal	86
5.9.2	Trabalho realizado pelo ciclo do motor Stirling.....	89
5.9.3	Transferência de calor em um motor ideal	90
5.9.4	Eficiência do ciclo térmico	91
5.9.5	Projeto dos motores Stirling	91
5.10	MOTOR STIRLING SOLAR	92
5.10.1	Condição de máxima eficiência de acordo com a metodologia Carnot	93
5.10.2	Condição de potência máxima.....	95
5.11	EFICIÊNCIA REAL DO SISTEMA.....	97
5.12	POTÊNCIA ELÉTRICA.....	99
CAPÍTULO 6. VALIDAÇÃO DO MODELO E ANÁLISE DOS RESULTADOS		100
6.1	MODELO MATEMÁTICO	100
6.1.1	Etapas da modelagem	102
6.1.2	Construção do modelo geral	103
6.2	METODOLOGIA APLICADA.....	104
6.3	VALIDAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS.....	109
6.3.1	Validação do modelo do movimento relativo solar para a cidade de Itajubá... 109	
6.3.2	Análise dos resultados do comportamento Solar.....	111
6.3.3	Dados obtidos a partir do modelo para diferentes parâmetros de projeto	120
6.3.4	Análise dos resultados do modelo para diferentes parâmetros de projeto.....	121
CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E RECOMENDAÇÕES.		128
7.1	CONCLUSÕES	128
7.2	CONTRIBUIÇÕES	130
7.3	RECOMENDAÇÕES	131
ANEXO.....		140

Lista de Tabelas

TABELA 2.1	COMPOSIÇÃO DO SOL	5
TABELA 2.2	PROPRIEDADES DE SELETIVIDADE DE ALGUNS MATERIAIS	11
TABELA 2.3	COMPARAÇÃO DE TECNOLOGIAS SOLARES TÉRMICAS.....	27
TABELA 2.4	ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO DOS SISTEMAS DISCO/STIRLING	29
TABELA 2.5	ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO DOS SISTEMAS DISCO/STIRLING	30
TABELA 2.6	ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO DOS SISTEMAS DISCO/STIRLING	31
TABELA 2.7	ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO DOS SISTEMAS DISCO/STIRLING	32
TABELA 3.1	EFEITOS DO ÂNGULO DE DECLINAÇÃO COM RESPEITO AO MESES DO ANO	45
TABELA 3.2	DATAS DAS ESTAÇÕES DO ANO PARA O HEMISFÉRIO TERRESTRE.	46
TABELA 3.3	LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA CIDADE DE ITAJUBÁ.....	50
TABELA 5.1	METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO RECEPTOR.....	84
TABELA 6.1	VALIDAÇÃO DE O MODELO SOLAR (NEST-SUNRISE)	110
TABELA 6.2	VALIDAÇÃO DE O MODELO SOLAR (NEST-SUNRISE)	111
TABELA 6.3	VARIAÇÃO DOS ÂNGULOS GEOMÉTRICOS DO MOVIMENTO APARENTE DO SOL, PARA A CIDADE DE ITAJUBÁ EM M.G-BRASIL.....	113
TABELA 6.4	VARIAÇÃO DOS ÂNGULOS GEOMÉTRICOS DO MOVIMENTO APARENTE DO SOL, PARA A CIDADE DE ITAJUBÁ EM M.G-BRASIL.	114
TABELA 6.5	QUADRO COMPARATIVO DA VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	117
TABELA 6.6	VALIDAÇÃO DO MODELO TÉRMICO (NEST-COMPEMDIUM SOLAR)	118
TABELA 6.7	VALIDAÇÃO DO MODELO TÉRMICO (NEST-COMPEMDIUM SOLAR)	119
TABELA 6.8	PARÂMETROS FIXOS NO MODELO SOLAR.....	120
TABELA 6.9	PROPRIEDADES DA SUPERFÍCIE DO COLETOR RECEPTOR	120
TABELA 6.10	PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO PROJETO	122
TABELA 6.11	COMPORTAMENTO DO MODELO GERAL PARA DIFERENTES PARÂMETROS DE PROJETO.	123
TABELA 6.12	COMPORTAMENTO DO MODELO GERAL PARA DIFERENTES PARÂMETROS DE PROJETO.	124

Lista de Figuras

FIGURA 2.1	PERDAS DE ENERGIA DA RADIAÇÃO SOLAR PARA UM CÉU CLARO.	6
FIGURA 2.2	COMPORTAMENTO DE UM RAIOS NUMA SUPERFÍCIE	7
FIGURA 2.3	REFLEXÃO ESPECULAR	8
FIGURA 2.4	LIMITE DE REFLEXÃO ENTRE DOIS MEIOS	9
FIGURA 2.5	DESCRIÇÃO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA DISH/STIRLING	12
FIGURA 2.6	ELEMENTOS DO SISTEMA DISH/STIRLING	13
FIGURA 2.7	DIFERENTES TECNOLOGIAS DOS SISTEMAS DISH/STIRLING.....	14
FIGURA 2.8	SISTEMA DE CONTROLE PARA UM SISTEMA DISH/STIRLING	15
FIGURA 2.9	SISTEMA DE MONITORAMENTO CONTROLADO POR SOFTWARE.....	16
FIGURA 2.10	RECEPTOR TIPO DIR	16
FIGURA 2.11	ESQUEMA DO FUNCIONAMENTO DE UM RECEPTOR TIPO HEAT PIPE.	17
FIGURA 2.12	RECEPTOR USADO NO SISTEMA VANGUARD I	18
FIGURA 2.13	SISTEMA ADVANCO VANGUARD.	19
FIGURA 2.14	RECEPTOR DO SISTEMA SBP (ARÁBIA SAUDITA)	20
FIGURA 2.15	DISCO/STIRLING DE 50 kWe NA ARÁBIA SAUDITA	20
FIGURA 2.16	SISTEMAS CONCENTRADOR/STIRLING FABRICADO POR SBP 1989	21
FIGURA 2.17	SISTEMA CPG DE 25 kWe	22
FIGURA 2.18	DISTAL I COLETOR SOLAR DE MEMBRANA ESTICADA	23
FIGURA 2.19	DISTAL II COLETOR SOLAR DE MEMBRANA ESTICADA	23
FIGURA 2.20	SISTEMA EURODISH DE 10 kWe.....	24
FIGURA 2.21	PROTÓTIPO CONSTRUÍDO PELA SAIC E STM “SISTEMA DISCO-STIRLING FASE 1 E FASE 2”.	25
FIGURA 2.22	PROTÓTIPO BIG DISH NO CAMPUS ANU	26
FIGURA 2.23	RELAÇÃO DE CONCENTRAÇÃO GEOMÉTRICA	34
FIGURA 2.24	GERAÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA PARA (1000 W/m ²)	35

FIGURA 2.25 CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA POR UNIDADE DE ÁREA DE COLETOR.....	36
FIGURA 2.26 GERAÇÃO DE POTÊNCIA TÉRMICA PARA (1000 W/M ²)	37
FIGURA 2.27 CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE POTÊNCIA TÉRMICA POR UNIDADE DE ÁREA DO RECEPTOR	38
FIGURA 2.28 EFICIÊNCIA DE TRANSFORMAÇÃO DE POTÊNCIA TÉRMICA EM POTÊNCIA ELÉTRICA	39
FIGURA 2.29 DISTRIBUIÇÃO DA EFICIÊNCIA EM TODO O SISTEMA	41
FIGURA 3.1 INCLINAÇÃO DA ÓRBITA TERRESTRE COM ÓRBITA EQUATORIAL.	43
FIGURA 3.2 ÂNGULO DE DECLINAÇÃO EM FUNÇÃO DA DATA	44
FIGURA 3.3 EQUAÇÃO DO TEMPO (EM MINUTOS) EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DO ANO	45
FIGURA 3.4 FATORES ENVOLVIDOS PARA CALCULAR A HORA SOLAR VERDADEIRA	46
FIGURA 3.5 ESQUEMA DA POSIÇÃO DO SOL EM RELAÇÃO A UMA SUPERFÍCIE HORIZONTAL	48
FIGURA 3.6 VARIAÇÃO DA IRRADIAÇÃO SOLAR NA CIDADE DE ITAJUBÁ (01/04/2010).....	51
FIGURA 3.7 VARIAÇÃO DA IRRADIAÇÃO SOLAR NA CIDADE DE ITAJUBÁ (15/04/2010).....	51
FIGURA 4.1 GEOMETRIA DE UMA PARÁBOLA	53
FIGURA 4.2 PARABOLÓIDE DE REVOLUÇÃO	54
FIGURA 4.3 DISTÂNCIAS EQUIVALENTES NO PARABOLÓIDE ADAPTADO DE (JARAMILLO S, 1998)	57
FIGURA 4.4 VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE DESVIO DA IRRADIAÇÃO SOLAR.....	59
FIGURA 4.5 RELAÇÕES TRIGONOMÉTRICAS	61
FIGURA 4.6 SECÇÃO TRANSVERSAL DE REFLETOR PARABÓLICO E O COMPORTAMENTO DE UM FEIXE DE RADIAÇÃO ADAPTADO DE (RAMIRES, 1989).....	63
FIGURA 4.7 RELAÇÃO DO ÂNGULO SOLAR ENTRE SOL-TERRA	64
FIGURA 4.8 ESQUEMA DE CONCENTRADOR COM RAIOS INCIDENTES NÃO PARALELOS	65
FIGURA 4.9 FATORES QUE AFETAM A CONCENTRAÇÃO SOLAR	66
FIGURA 4.10 VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO SOLAR	67
FIGURA 4.11 ESQUEMA REPRESENTATIVO DAS CAUSAS DOS ERROS ÓTICOS.	68
FIGURA 4.12 ERRO DE DISPERSÃO NUM RECEPTOR DE ENERGIA SOLAR.	69
FIGURA 4.13 IMAGENS FORMADAS NO PLANO FOCAL DO CONCENTRADOR SOLAR.....	70
FIGURA 5.1 ESQUEMA DO BALANÇO TÉRMICO DO COLETOR PARABÓLICO STIRLING	74
FIGURA 5.2 SOMBRA CAUSADA PELO RECEPTOR.....	76
FIGURA 5.3 COMPORTAMENTO DO FATOR $f_s * \gamma$ EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE BORDA	76
FIGURA 5.4 VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO RECEPTOR EM FUNÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E A CONCENTRAÇÃO SOLAR.	78

FIGURA 5.5	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO RECEPTOR PARA DIFERENTES FATORES DE Katenuação	79
FIGURA 5.6	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA TEÓRICA NO RECEPTOR PARA CONDIÇÕES DE INSOLAÇÃO TÍPICA DA CIDADE DE ITAJUBÁ NO DIA 15/04/2010.....	80
FIGURA 5.7	VARIAÇÃO DAS PERDAS POR RADIAÇÃO PARA CONDIÇÕES DE INSOLAÇÃO TÍPICA DA CIDADE DE ITAJUBÁ NO DIA 15/04/2010.....	81
FIGURA 5.8	VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO NO DIA 15/04/2010.....	82
FIGURA 5.9	VARIAÇÃO DAS PERDAS DE CONVECÇÃO PARA CONDIÇÕES DE INSOLAÇÃO TÍPICA DA CIDADE DE ITAJUBÁ NO DIA 15/04/2010.....	82
FIGURA 5.10	VARIAÇÃO NA EFICIÊNCIA DO RECEPTOR CALCULADA POR TRÊS METODOLOGIAS DIFERENTES, PARA CONDIÇÕES DE INSOLAÇÃO TÍPICA DA CIDADE DE ITAJUBÁ NO DIA 15/04/2010.....	84
FIGURA 5.11	VOLUME MÁXIMO DO FLUIDO NO ESPAÇO DE COMPRESSÃO.....	87
FIGURA 5.12	VOLUME MÍNIMO DO FLUIDO NO ESPAÇO DE COMPRESSÃO.....	87
FIGURA 5.13	VOLUME MÍNIMO DO FLUIDO NO ESPAÇO DE EXPANSÃO.....	87
FIGURA 5.14	VOLUME MÁXIMO DO FLUIDO NO ESPAÇO DE EXPANSÃO.....	88
FIGURA 5.15	VOLUME MÁXIMO DO FLUIDO NO ESPAÇO DE COMPRESSÃO.....	88
FIGURA 5.16	CICLO TERMODINÂMICO DO MOTOR STIRLING.....	89
FIGURA 5.17	MÁXIMA EFICIÊNCIA POSSÍVEL PARA DIFERENTES NÍVEIS DE IRRADIAÇÃO SOLAR	94
FIGURA 5.18	EFICIÊNCIA DO MOTOR STIRLING PARA UM VALOR DE $K_s = 0,55$	96
FIGURA 5.19	MÁXIMA POTÊNCIA POSSÍVEL PARA DIFERENTES NÍVEIS DE IRRADIAÇÃO SOLAR	97
FIGURA 5.20	COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA GLOBAL UTILIZANDO TRÊS METODOLOGIAS, PARA AS CONDIÇÕES DE INSOLAÇÃO TÍPICA DA CIDADE DE ITAJUBÁ NO DIA 15/04/2010.....	98
FIGURA 5.21	EFICIÊNCIA MÁXIMA POSSÍVEL PARA CONDIÇÕES ÓTIMAS NO SISTEMA	98
FIGURA 5.22	COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO NA POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA PELO SISTEMA DISH/STIRLING UTILIZANDO TRÊS METODOLOGIAS, PARA AS CONDIÇÕES DE INSOLAÇÃO TÍPICA DA CIDADE DE ITAJUBÁ NO DIA 15/04/2010.....	99
FIGURA 6.1	METODOLOGIAS PROPOSTAS PARA O TRABALHO	101
FIGURA 6.2	MODELO DO PROCESSO.....	102
FIGURA 6.3	ETAPAS DA MODELAGEM.....	102
FIGURA 6.4	ETAPAS DA CONSTRUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	103
FIGURA 6.5	METODOLOGIA ANALÍTICA DO MODELO	105

FIGURA 6.6	FLUXO DE ENERGIA NO SISTEMA DISH/STIRLING	105
FIGURA 6.7	ALGORÍTMO DE SOLUÇÃO DO MODELO DO MOVIMENTO RELATIVO DO SOL	106
FIGURA 6.8	ALGORÍTMO DE SOLUÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO E DIMENSIONAMENTO DO COLETOR.....	107
FIGURA 6.9	ALGORÍTMO DE SOLUÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA	108
FIGURA 6.10	VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA	109
FIGURA 6.11	VALIDAÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA	115
FIGURA 6.12	VALIDAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO RECEPTOR.....	116
FIGURA 6.13	VALIDAÇÃO DA EFICIÊNCIA GERAL DO SISTEMA.....	116
FIGURA 6.14	DISTÂNCIA IDEAL DO RECEPTOR NO SISTEMAS DISH/STIRLING.....	121
FIGURA 6.15	INFLUENCIA DO DIÂMETRO DE ABERTURA DO COLETOR SOBRE AS PERDAS POR RADIAÇÃO E CONVECÇÃO	125
FIGURA 6.16	INFLUENCIA DO DIÂMETRO DE ABERTURA DO COLETOR SOBRE AS EFICIÊNCIAS DO RECEPTOR UTILIZANDO TRÊS METODOLOGIAS	125
FIGURA 6.17	INFLUENCIA DO DIÂMETRO DE ABERTURA DO COLETOR SOBRE A POTÊNCIA ELÉTRICA DO SISTEMA	126
FIGURA 6.18	COMPORTAMENTO DO SISTEMA DISH/STIRLING	127
FIGURA 6.19	DISTRIBUIÇÃO DAS PERDAS NO SISTEMA DISH/STIRLING PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	127

Simbologia

Letras Latinas

a	Curvatura da parábola	1/m
A_a	Área de abertura	m^2
A_r	Área do receptor no motor Stirling	m^2
A_e	Área da elipse	m^2
A_{ims}	Área da imagem solar formada no receptor	m^2
C_V	Calor específico a volume constante	(J/kg * K)
C_p	Calor específico a pressão constante	(J/kg * K)
C_h	Altura de projeto do receptor	m
d_f	Distância do projeto do receptor	m
D_{ims}	Diâmetro da imagem solar formada no receptor	m
D_p	Diâmetro da parábola	m
D_r	Diâmetro do receptor	m
E	Eficiência total	
E_t	Equação do tempo	min
f	Foco	m
f_t	Fração área sombreada	
f_s	Fator de área não sombreada	
F	Erro de dispersão	
G_b	Irradiação solar direta	W/m ²
h	Altura da parábola	m
h_c	Constante de convecção	W/m ² K
h_l	Hora local	h
I_{cs}	Constante solar	W/m ²
L	Distância de desvio do sol	m
m_{con}	Meridiano convencional	(Graus)
m_{loc}	Meridiano local	(Graus)
n	Dia do ano (Entre 1 e 365)	
P	Pressão	Pa

q	Transferência de calor por unidade de massa	J/kg
Q_{abs}	Energia recebida no absorvedor	J/s
Q_l	Perdas de calor no receptor	J/s
Q_r	Energia radiante solar que incidente no receptor	J/s
Q_s	Energia solar na abertura do concentrador	J/s
Q_u	Energia útil captada	J/s
Q_{l0}	Perda óptica do coletor	J/s
r_r	Raio de borda	m
R	Constante de gases	(J/kg * K)
S	Comprimento de onda	m
T_c	Temperatura da zona fria do motor Stirling	K
T_{sky}	Temperatura do ar em graus	K
T_r	Temperatura do receptor	K
T_a	Temperatura do ambiente	K
T_H	Temperatura zona quente	K
T_L	Temperatura zona fria	K
U	Energia interna específica	J/kg
V	Volume	m^3
v_{max}	Volume máximo	m^3
v_{min}	Volume mínimo	m^3
W	Trabalho	J
X	1 em verão	
X	0 em inverno	

Letras Gregas

$d\Delta$	Varição de distância da radiação solar no receptor	m
ρ	Refletância do espelho	
τ_{abs}	Transmitância da superfície absorvedora	
α_{abs}	Absorbância do absorvedor	
α	Ângulo solar	(Graus)
γ	Fator de configuração geometria	
θ_i	Angulo de incidência	(Graus)
θ_r	Angulo de refração	(Graus)
δ	Ângulo de declinação	(Graus)
$\cos\theta_i$	Fator de seguimento	
ϕ	Fator de intercepção	
ϕ_r	Fator de borde	
ε	Emissividade no absorvedor	
σ	Constante Stefan-Boltzmann	$\text{W/m}^2\text{K}^4$
τ_{abs}	Transmitância	
λ	Comprimento de onda	μm
η_o	Eficiência ótica	
η_E	Eficiência do motor Stirling	
η_c	Eficiência do Concentrador	
$\eta_{c,\text{inst}}$	Eficiência instantânea	
η_{rec}	Eficiência do receptor	
$\eta_{\text{Curzon-Ahborn}}$	Rendimento de Curzon-Ahlborn	
η_{IT}	Eficiência do motor Stirling	
v	Volume específico	m^3/kg

Subscritos

C	Relativo ao volume de compressão, relativo ao Cooler
E	Relativo ao volume de expansão
H	Relativo ao trocador de calor de aquecimento (Heatér)
R	Relativo ao regenerador

Siglas

ANU	Australian National University
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
CPG	Cummins Power Generation, Inc.
CSP	Concentratéd Solar Power
DIR	Direct-illumination receivers
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espacial
MDAC	McDonnell Douglas Aerospace Corporation
NEST	Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída
PSA	Plataforma Solar de Almería
PCS	Power Conversion System
PCU	Power Conversion Unit
SAIC	Science Applications International Corporation
SBP	Schlaich, Bergermann und Partner
SES	Stirling Energy Systems
SPS	Stirling Power Systems
STC	Stirling Technology Corporation
STM	Stirling Thermal Motors, Inc.
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment
TSV	Tempo solar verdadeiro
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá

Capítulo 1.

INTRODUÇÃO

Dentro das tecnologias solar térmicas os sistemas compostos por disco parabólico e um motor Stirling, comumente conhecido como sistemas Dish/Stirling, alcançam a maior eficiência de conversão da energia solar em energia elétrica (valores máximos próximos 29% e 30%), para potência instalada entre 1 e 25 kWe (Andraka, et al., 1990). Estas tecnologias são usadas para gerar energia elétrica diretamente através de um motor Stirling sem consumir água. A barreira para este tipo de tecnologia se define pelo alto custo dos elementos Coletor/Receptor, o dispositivo de rastreamento e o motor Stirling, além de ter baixas potências por unidade. Na atualidade empresas como Endesa na Espanha, participam em um programa pioneiro com o objetivo de demonstrar a viabilidade técnica e econômica do sistema Dish/Stirling (Endesa, 2010).

Entre as tecnologias solares os sistemas Dish/Stirling não têm sido amplamente testados e comparados com outros sistemas solares tais como; cilíndricos parabólicos, sistemas fotovoltaicos, etc, assim sendo a informação sobre esta tecnologia é escassa, e os parâmetros de projeto de alguns sistemas já construídos não estão disponíveis para a comunidade acadêmica. Surgiu então, a necessidade de elaborar um modelo matemático para estudar o desempenho geral do sistema Dish/Stirling nas condições operacionais da cidade de Itajubá-MG, Brasil.

Existem vários métodos para analisar o comportamento da medição da radiação eletromagnética, absorvida, refletida e emitida pelo sistema Dish/Stirling, classificados em fotometria, calorimetria, analítica e numérica. A metodologia deste trabalho é baseada em métodos analíticos e numéricos. O método analítico é utilizado para decompor o estudo do

sistema solar em três etapas; caracterização do movimento relativo do sol, projeto geométrico do sistema Coletor/Receptor e balanço térmico do sistema Dish/Stirling que ajuda a determinar os parâmetros mais relevantes para o cálculo do aporte energético da irradiação solar. O método numérico está baseado em equações físicas e térmicas que permitem elaborar um algoritmo sequencial que descreve o comportamento geral do sistema solar e calcula o aporte energético da irradiação solar incidente para a geração de eletricidade.

O programa feito em Matlab constitui uma ferramenta importante por seu caráter numérico, o que permite estudar e analisar vários tipos de casos, e possibilita modificar a geometria do Coletor/Receptor para maximizar a energia elétrica.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O Brasil é um país privilegiado por ter grande cobertura de radiação solar para o uso na geração de energia elétrica. Existem estudos que descrevem o mapeamento da radiação solar, como os realizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais “INPE”, que utiliza o projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment) que tem como objetivo facilitar a inclusão de fontes renováveis na matriz energética. Outro motivo importante é a obtenção de incentivos nos próximos anos para desenvolvimentos futuros em plantas solares, fotovoltaicas ou térmicas de até 30 MW de potência, a serem interligadas ao sistema, com 80% de desconto nas taxas de uso do sistema de distribuição e transmissão pelos 10 primeiros anos (Canazio, 2011).

A Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) trabalha em projetos de pesquisa com motores Stirling, que devido a sua característica de combustão externa, pode ser utilizado com qualquer fonte de calor externa, neste caso energia solar, para a geração de eletricidade. Para cada projeto e construção de instalações solares de conversão de energia, devem considerar-se as características reais de irradiação solar, a temperatura ambiente e a velocidade do vento que definem os parâmetros geométricos e térmicos que fazem viável estes sistemas.

Este trabalho proporciona a base para a implementação de um projeto experimental (CPFL: SHSB-Sistemas híbrido Solar/Biomassa), na Universidade Federal de Itajubá, usando este protótipo como apoio à rede quando a intensidade solar é elevada e a demanda de energia cresce devido ao uso de ar condicionado.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo fundamental do trabalho é desenvolver a modelação de um sistema de geração de energia elétrica a partir da radiação solar na cidade de Itajubá, utilizando a tecnologia Dish/Stirling. Propõem-se os seguintes objetivos específicos:

1. Elaborar um estudo da literatura sobre a evolução das tecnologias de Dish/Stirling para identificar indicadores de comparação;
2. Avaliação e caracterização do comportamento das condições de radiação solar na cidade de Itajubá- MG, Brasil;
3. Elaborar um modelo opto-geométrico para o Coletor /Receptor;
4. Elaborar um modelo térmico do sistema Dish/Stirling;
5. Validação do modelo geral desenvolvido.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A organização estrutura da dissertação é:

Capítulo 1. Contém uma contextualização do tópico estudado, os objetivos fixados e a justificativa da elaboração de um programa computacional de cálculo sequencial para a análise térmica do sistema solar.

Capítulo 2. Apresenta o estado da arte que descreve as características das tecnologias Dish/Stirling desenvolvidas nos últimos tempos, mostrando os principais parâmetros de projeto geométrico e térmico de cada tecnologia solar Dish/Stirling. A realização desta revisão serve para estabelecer indicadores de comparação a partir das relações de funcionamento opto-geométricas encontrada nas tabelas de descrição.

Capítulo 3. Apresenta os fundamentos teóricos e físicos do comportamento da radiação solar para encontrar a hora solar verdadeira, os ângulos que caracterizam o movimento relativo do sol, a hora de saída e de pôr do sol para a cidade de Itajubá-MG, Brasil, para cada momento do ano, que servem como base para o projeto do rastreamento solar, para calcular o

tempo de insolação solar durante o dia e minimizar o ângulo de incidência que é importante para maximizar a energia captada na cavidade do receptor solar.

Capítulo 4. Apresenta o sistema Coletor/Receptor, estabelecido por um parabolóide de revolução. Neste capítulo, a formulação matemática é desenvolvida a partir de equações físicas da ótica, a fim de encontrar relações de projeto ótimas, ângulos e distâncias baseadas no diâmetro do coletor para maximizar a concentração solar no receptor.

Capítulo 5. Neste capítulo realiza-se um balanço de energia, que em função dos parâmetros opto-geométricos, apresenta-se uma análise do valor máximo de energia solar que é possível converter em energia elétrica, além de apresenta como caso de estudo o comportamento do sistema completo acoplado ao motor Stirling para a condição de máxima eficiência e máxima potência.

Capítulo 6. Apresenta a metodologia utilizada e a análise dos resultados obtidos pelo modelo solar, dividido em três fases: caracterização do movimento relativo solar para a cidade de Itajubá-Brasil, configuração geométrica do sistema Disco/Receptor e o balanço energético do sistema completo; refletido nas tabelas e gráficos. Além de apresentar a validação do modelo comparando-o com a literatura científica mencionada neste capítulo.

Capítulo 7. Apresenta as conclusões do trabalho, onde de maneira geral se resume e especifica a contribuição da investigação, além de apresentar sugestões para futuros trabalhos. Após o Capítulo VII, são apresentadas as referências bibliográficas contendo a lista de livros, artigos, dissertações, teses, etc.

Capítulo 2.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RECURSO SOLAR

O sol é a estrela mais próxima da Terra e seu núcleo tem uma temperatura aproximadamente de 15 milhões de graus Celsius, na superfície atinge uma temperatura média de 5.770 °C (Jessica, 2010). O sol é constituído principalmente de átomos de hidrogênio e hélio. A tabela 2.1 apresenta os componentes químicos principais do sol:

Tabela 2.1 Composição do sol (Castellanos et al., 2009).

Componentes químicos principais	Porcentagem
Hidrogênio	92,1 %
Hélio	7,8%
Oxigênio	0,061%
Carbono	0,030%
Nitrogênio	0,0084%
Outros	0,0015%

A irradiação espectral é a intensidade de radiação recebida em cada comprimento de onda, a unidade de medida é o W/m^2 . Na equação (2-1) mostra a constante solar que é a quantidade de energia recebida na forma de radiação solar por unidade de tempo e unidade de área, medido no lado de fora da atmosfera num plano perpendicular aos raios solares. (Montes P, 2008)

$$I_{cs} = 1367 [W/m^2] \quad (2-1)$$

2.1.1 Radiação solar ao nível do solo

Ao atravessar a atmosfera, a radiação solar é atenuada por processos físicos de espalhamento e absorção com os constituintes atmosféricos e a superfície do planeta. Para trabalhos de altas temperaturas a componente de irradiação mais importante é a componente direta, que está definida como a radiação que atinge a superfície terrestre na forma de raios do sol, sem mudanças de direção. Existem outras componentes que são importantes para o estudo de sistemas termo solares que implicam às perdas nos sistemas como a irradiação solar refletida e a irradiação difusa causada pelo efeito das nuvens ou partículas em suspensão (Gómez, 2011).

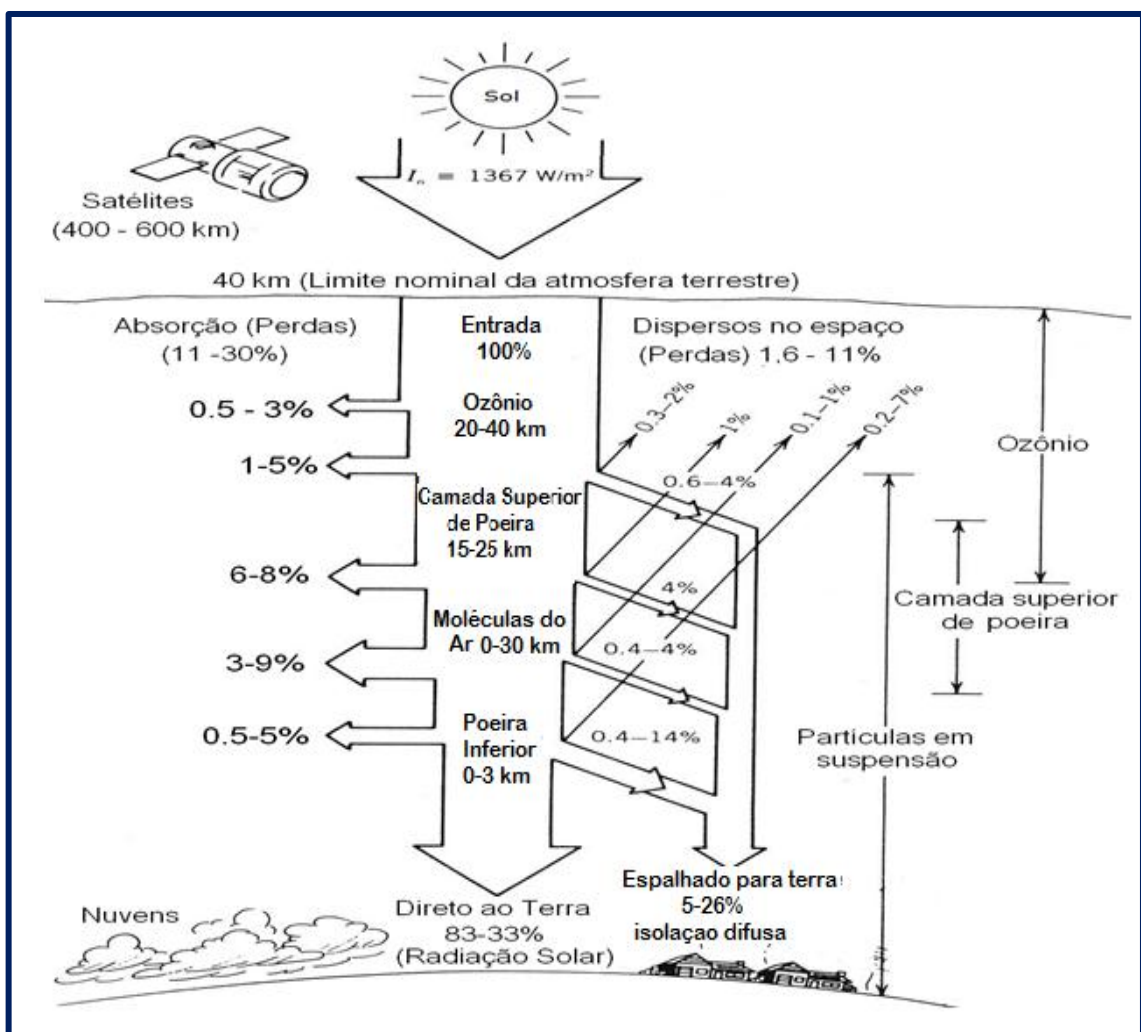


Figura 2.1 Perdas de energia da radiação solar para um céu claro. (Gómez, 2011)

A Figura 2.1 mostra as perdas da irradiação solar ao atravessar a atmosfera através do percurso sobre a superfície da Terra. A irradiação solar liberada é absorvida ou refletida pelas nuvens, pelos gases e partículas atmosféricas tais como o vapor de água condensado e

pela superfície do planeta. Para um dia de céu aberto a irradiação solar pode estar na faixa de 83 a 90 % da quantidade total de energia solar e para um dia muito nublado pode ser 33% (Gómez, 2011)

2.1.2 Transferência de calor em sistemas de alta temperatura

Os sistemas termo solares que utilizam coletores parabólicos permite um aproveitamento mais eficiente da energia solar que os sistemas não concentradores. Estes sistemas atingem temperaturas elevadas entre 650 e 780 °C, devido à quantidade de radiação solar que chega à superfície do espelho coletor e é refletida para um receptor situado na cavidade focal da parábola, transformando a energia térmica em energia mecânica. A segunda lei da termodinâmica indica que a eficiência da máquina térmica é tão elevada quanto maior seja a temperatura de funcionamento (Silva, 2004). No entanto, estes sistemas são limitados pelos princípios da transferência de calor como condução, convecção e radiação que são estudados para compreender os fenômenos de transferência de calor.

2.2 ÓTICA DOS CONCENTRADORES

Quando um feixe de luz atinge uma superfície plana que separa dois meios, (ar, água, etc.), como mostra a Figura 2.2, uma parte do feixe é refletida fora do material, e o restante penetra no material. Os ângulos i , r , r' são chamados ângulos de incidência, reflexão e refração respectivamente.

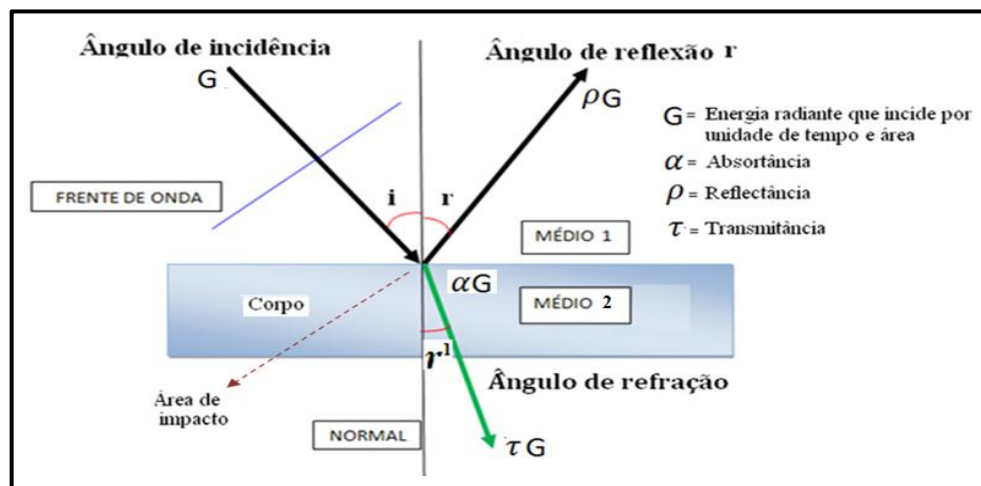


Figura 2.2 Comportamento de um raio numa superfície (Díez, 2002)

Estes ângulos estão relacionados pelas seguintes leis experimentais:

2.2.1 Reflexão

O fenômeno reflexão ocorre quando a luz incide sobre a superfície de separação entre dois meios com propriedades distintas, sejam gases, a atmosfera, líquidos como água e sólidos. A direção da luz refletida é determinada pelo tipo de superfície e dá como resultado os tipos de reflexão (Batista, 2007):

- **Reflexão especular ou regular:** Ocorre quando a superfície refletora é lisa, como mostra a figura 2,3, e ocorre da seguinte maneira:
 1. O raio incidente, o raio refletido e a normal à superfície de separação estão num mesmo plano.
 2. O ângulo de incidência θ_i é igual ao ângulo de reflexão θ_r .

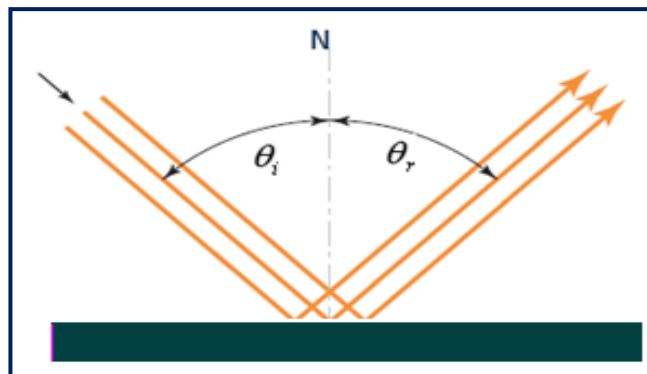


Figura 2.3 Reflexão especular (Díez, 2002)

- **Reflexão difusa:** é a reflexão que ocorre numa superfície irregular (rugosa). Nesta reflexão os raios espalham-se desordenadamente em todas as direções. (Díez, 2002).
- **Reflexão mista:** É uma reflexão intermediária entre especular e difusa, em que parte do feixe incidente é refletido e parte do feixe é difuso (Díez, 2002).

2.2.2 Refração

Ao passar de um meio para outro, o raio de luz pode mudar de direção. Essa mudança é causada por uma alteração na velocidade da luz. Esta mudança na velocidade e direção é

chamada de refração. A distância D da figura 2.4 é conhecida como deslocamento. O deslocamento depende do ângulo de incidência e do índice de refração (Díez, 2002).

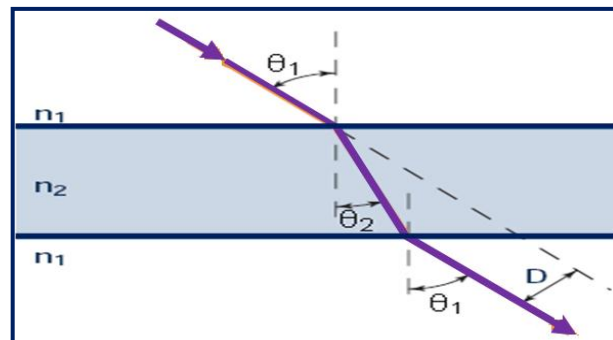


Figura 2.4 Limite de refração entre dois meios (Díez, 2002)

Existem duas leis da refração:

1. O raio incidente, o raio refletido e a reta normal no ponto de incidência estão contidos num mesmo plano.
2. A razão entre o seno do ângulo de incidência e seno do ângulo de refração é igual ao quociente entre as velocidades dos dois meios definida como a “Lei de Snell”, dada na equação (2-2).

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \rightarrow \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = n \quad (2-2)$$

Para o ar, $n = 1$ e quando o meio é a água, $n = 1,33$.

2.2.3 Emissão de superfícies

Emissividade é uma propriedade relevante para todos os materiais, quando se deseja fazer análises pertinentes à radiação. A emissividade espectral é definida como a razão entre o poder emissivo espectral da superfície em questão e o poder emissivo espectral de um corpo negro à mesma temperatura (Batista, 2007). A capacidade de um objeto para emitir radiação infravermelha depende de vários fatores incluindo o tipo de material de estado da superfície, e o comprimento de onda. Assim, a emissividade é expressa como (Díez, 2002):

$$\varepsilon = \frac{\text{Radiação emitida por um objeto à temperatura } T^\circ}{\text{A radiação emitida por um corpo negro à temperatura } T^\circ} \quad (2-3)$$

A emissividade varia entre 0 e 1, e esta relacionada com a capacidade de refrigeração de radiação de um corpo (Díez, 2002). As seguintes observações podem ser feitas em relações a emissividade para alguns materiais (Batista, 2007):

- ✓ A emissividade para superfícies metálicas é geralmente pequena, alcançando valores baixos como 0,02 para ouro e prata altamente polidos.
- ✓ A emissividade dos não condutores é comparativamente alta, excedendo geralmente 0,60.
- ✓ A presença da camada de óxido pode aumentar significativamente a emissividade de superfícies metálicas. Contraste com o valor de 0,10 para o aço inoxidável levemente oxidado para o valor de aproximadamente 0,50 para a forma fortemente oxidada.

2.2.4 Absortividade

É a transformação de energia radiante em outra forma de energia (calor), em superfícies que não são totalmente reflexivas e materiais que não são completamente transparentes. A absorção é dada pela seguinte relação (Batista, 2007):

$$\alpha_{abs}(\lambda, \theta_{zs}, \psi_s) = \frac{I_{\lambda, iabsor}(\lambda, \theta_{zs}, \psi_s)}{I_{\lambda, incidente}(\lambda, \theta_{zs}, \psi_s)} \quad (2-4)$$

Onde, θ_{zs} e ψ_s representam, os ângulos de zênite e azimute das coordenadas esféricas respectivamente, e λ comprimento de onda, estes ângulos se estudarão no Capítulo 3.

Se $\alpha_{abs}=0$ é um espelho perfeito que não absorve a radiação; se $\alpha_{abs}=1$ é um corpo negro perfeito que absorve toda a radiação.

- **Superfícies seletivas:** A seletividade de uma superfície é dada pela razão entre absorbância e emitância, que dependem do comprimento de onda. O receptor deve ter uma superfície com alta absorbância para o espectro solar visível, e emitância baixa para radiação de onda longa (infravermelho), isto é conseguido pelo escurecimento da superfície. Quando as superfícies têm valores de seletividade igual à unidade a superfície é não seletiva. A seletividade esta determinada pela equação 2.5, (Díez, 2002).

$$\text{Seletividade} = \frac{\alpha_{abs}}{\varepsilon} \quad (2-5)$$

A magnitude α_{abs}/ε é de interesse em engenharia e deve ter valores pequenos para superfícies que visem dissipar calor, e valores grandes para superfícies que objetivem absorver a radiação solar (Batista, 2007). A tabela 2.2 mostra algumas superfícies seletivas.

Tabela 2.2 Propriedades de seletividade de alguns materiais (Díez, 2002)

Superfície	α_s	ϵ	α_s/ϵ
Níquel preto “Eletrodeposição de Níquel, Zinco e outros materiais”.	0,91	0,12	7,58
Óxido de cobre sobre alumínio	0,93	0,11	8,45
Óxido de cobre sobre cobre	0,89	0,17	5,23
Sulfeto de cobre sobre alumínio	0,88	0,22	4,4
Carbono sobre cobre	0,9	0,16	5,63
Preto de Cobre sobre Cobre	0,89	0,1	8,9
Preta Cr2O3 com SnO2	0,92	0,15	0,61

2.2.5 Transmissão através de meios transparentes

A transmitância consiste essencialmente na parcela da irradiação que atravessa o material da superfície receptora, sobre a irradiação total. Para meios transparentes a soma da absorvância, refletância e transmitância é a unidade (Batista, 2007):

$$\alpha_{abs} + \rho + \tau = 1 \quad (2-6)$$

Onde:

$\tau =$ Transmitância do corpo

Para corpos opacos $\tau = 0$ então:

$$\alpha_{abs} + \rho = 1 \quad (2-7)$$

De acordo com Batista (2007) a transmitância é representada como:

$$\tau = \frac{\text{Radiação que passou através da superfície transparente}}{\text{Radiação incidente}} \quad (2-8)$$

Este valor de τ depende do ângulo de incidência da radiação com relação à superfície. Portanto, para aplicações de energia solar são usados materiais transparentes com baixo índice de refração, a fim de aumentar a eficiência de transmissão e ter um mínimo de perdas de reflexão (Batista, 2007).

2.3 SISTEMAS DISH/STIRLING

A capacidade de geração de energia elétrica utilizando sistemas Dish/Stirling é determinada pela quantidade de radiação solar que atinge a superfície do espelho coletor, e é refletida para o receptor localizado no foco da parábola. Para que a irradiação seja aproveitada ao máximo é necessário minimizar o ângulo de incidência, o qual varia muito durante o dia e durante o ano. Os sistemas concentradores Dish/Stirling estão em constante evolução tecnológica, considerados de alta temperatura entre 650 e 780 °C e alta eficiência na conversão de energia solar em eletricidade, entre 22 e 30%, além de ter a capacidade de funcionar como um sistema híbrido (capacidade de utilizar biogás, Sol, biomassa, etc.) (Andraka, 1996).

O tamanho do concentrador solar no sistema Dish/Stirling é determinado pela potência desejada na saída. Por exemplo, para gerar 5 kWe o prato parabólico deve ter um diâmetro de $\pm 5,5$ m e para ter uma potência de 25 kWe o prato parabólico deve ter um diâmetro entre 8,5 m e 9,5 m; a geometria do prato parabólico permite concentrações que vão desde 600 até 3000 soles, e pode atingir temperaturas na cavidade do receptor de até 700 °C (Minassians, 2007). A figura 2.5 apresenta um sistema Dish/Stirling.

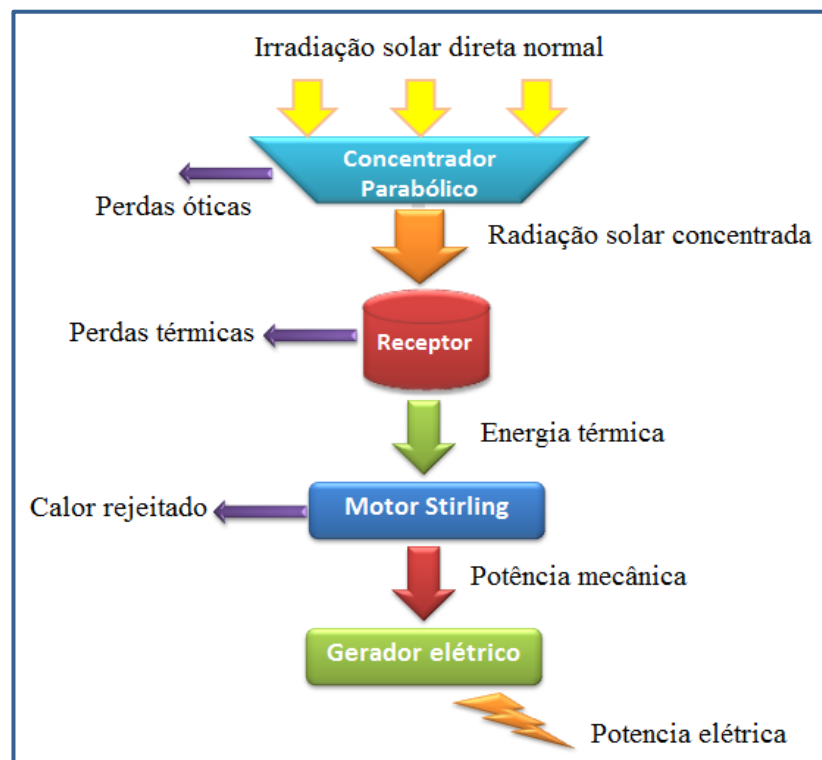


Figura 2.5 Descrição do comportamento do sistema Dish/Stirling (Mohamed et al., 2011).

O espelho coletor recebe a radiação máxima na superfície devido ao controle de rastreamento solar que é geralmente Azimute/Elevação, responsável por dirigir a irradiação solar no receptor localizado no ponto focal do coletor; nesta fase às perdas ópticas ocorre devido ao tipo de material utilizado. A irradiação concentrada na cavidade do receptor atinge temperaturas elevadas entre 650 e 780 ° C, que aquece um fluido de trabalho (hélio, hidrogênio ou ar) no motor Stirling para produzir potência mecânica em potência elétrica, neste processo ocorrem perdas térmicas que são rejeitadas ao ambiente.

2.3.1 Componentes do sistema Dish/Stirling

Estes sistemas são compostos de diferentes dispositivos que atendem a objetivos importantes dentro da captação de energia solar. Na figura 2.6 se apresenta uma instalação de um sistema Stirling, onde são mostrados os elementos mais importantes:

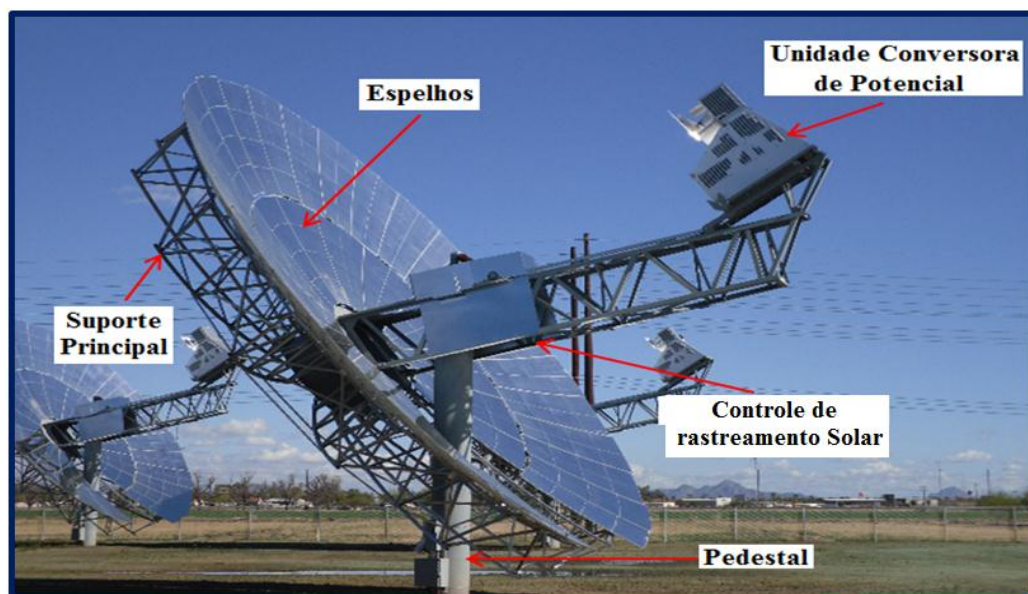


Figura 2.6 Elementos do Sistema Dish/Stirling (DeMeo e Galdo, 1997)

2.3.1.1 Captador Solar parabólico

Contêm uma superfície refletora que concentra a radiação solar incidente numa pequena região chamada foco. Seu tamanho é determinado pelo motor, receptor e condições de radiação direta na área de instalação. Os captadores utilizam superfícies reflexivas de vários materiais (placas de plástico reforçado com fibra de vidro, espelhos de prata/vidro, alumínio e diferentes tipos de polímeros). Dependendo da espessura e da reflexão dos materiais utilizados, os espelhos apresentam rendimentos entre 90 e 94% (DeMeo e Galdo, 1997).

O coletor solar tem diferentes tipologias de tecnologias de pratos parabólicos com motor Stirling, apresentadas na figura 2.7 e organizados de acordo com o material (Casals, 2001).

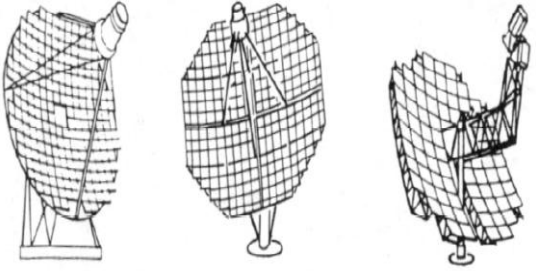
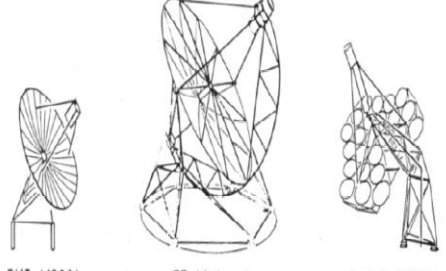
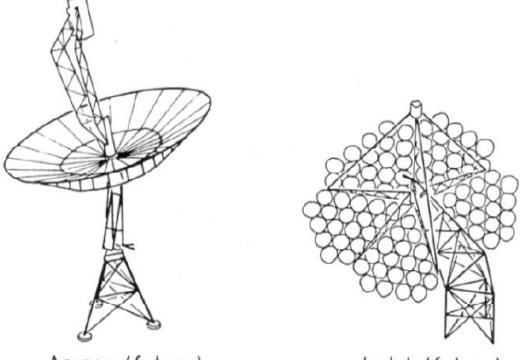
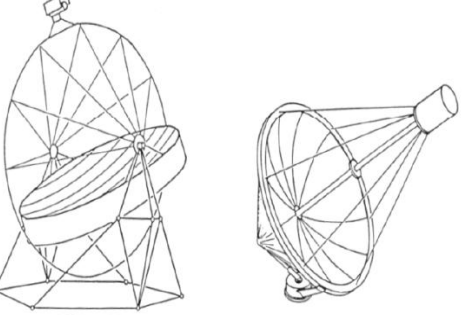
TECNOLOGIA VIDRO METAL	TECNOLOGIA DE PELÍCULA ALUMINIZADO
 <p>TBC (1977) φ 11m; C = 3000</p> <p>Vanguard (1980) φ 11m; C = 2800</p> <p>MDAC (1984) φ 11m; C = 2400</p>	 <p>SKI (1980) φ 7m; C = 250</p> <p>GE (future) φ 12m; C = 1000</p> <p>LaJet (1986) φ 7,4m; C = 800</p>
TECNOLOGIA PRATA-POLÍMERO/ PRATA-AÇO	TECNOLOGIA DE PELÍCULA MEMBRANA ESTICADA
 <p>Acurex (future) φ 15m; C = 1100</p> <p>LaJet (future) φ 15m; C = 700</p>	 <p>SBP (1983) φ 17m; C = 600</p> <p>SKI (future) φ 15m;</p>

Figura 2.7 Diferentes tecnologias dos sistemas Dish/Stirling (Casals, 2001)

- Sistemas solares como o Vanguard (1980), MDAC "McDonnell Douglas Aerospace Corporation, 1984" apresentadas na tabela 2.3, utilizam uma superfície de vários espelhos refletores de Vidro/Metal. Estes sistemas geralmente têm uma alta concentração de energia solar que é vantajoso para manter as temperaturas altas no receptor, mas tendem a ser muito pesados e caros, além de exigir um alinhamento preciso de seus espelhos no prato solar (Mohamed et al., 2011).
- Superfícies refletoras de alumínio ou prata depositado em vidro ou plástico são mais duráveis, com um valor de refletância na faixa de 95%. Este conceito é usado em muitos projetos atuais de concentração solar, devido a seu baixo custo. Sua principal desvantagem é que têm uma moderada refletância especular (85%) e baixa resistência à ao ar livre (DeMeoe Galdo, 1997).

- As superfícies refletoras à base de polímeros têm baixo custo, mas as propriedades óticas e mecânicas deste material são afetadas após da exposição prolongada aos raios ultravioleta. Estas superfícies são caracterizadas por terem uma flexibilidade alta (96%) (Mohamed et al., 2011).
- As tecnologias membranas esticadas são de superfícies lisas. Estas membranas são feitas de plásticos finos ou folhas de metal fino. Esta tecnologia tem problemas no comportamento dos materiais, devido serem maltratadas pelas partículas que flutuam no ar (poeira, areia, etc.) (Mohamed et al., 2011).

2.3.1.2 Sistema de controle de seguimento do sol

Os sistemas Dish/Stirling têm a necessidade de rastrear o movimento do sol, de modo que os raios incidam perpendicularmente à superfície do coletor. Existem vários tipos de sistemas de controle de rastreamento solar (Keck e Schiel, 2003):

1. **Rastreamento Azimute/Elevação:** O prato solar tem alguns atuadores que giram o captador num plano paralelo a terra, da esquerda para a direita (Azimute) como mostra a figura 2,8. Ele também tem outra estrutura acoplada ao coletor que lhe dá a habilidade de virar para cima e para baixo (elevação).



Figura 2.8 Sistema de controle para um sistema Dish/Stirling (Burgess, 2006)

2. **Método de rastreamento polar:** O disco coletor gira em torno a um eixo paralelo ao eixo de rotação da terra e seu monitoramento é realizado em coordenadas polares, utilizando monitoramento por software como é mostrado na figura 2,9. Este controle de rastreamento é utilizado para pequenos coletores, em vista das cargas da estrutura apoiadas numa única coluna (Keck e Schiel, 2003).

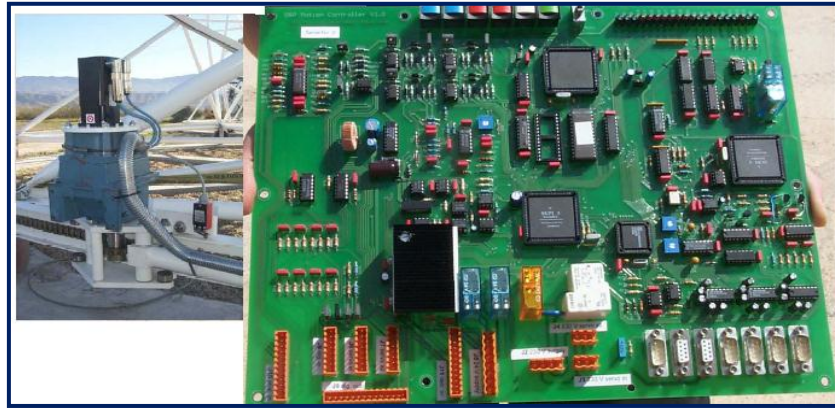


Figura 2.9 Sistema de monitoramento controlado por software (Keck e Schiel, 2003)

2.3.1.3 Trocador de calor solar (Receptor)

O receptor é o elemento que realiza a ligação térmica entre o concentrador e o motor Stirling. Este mecanismo é projetado para maximizar a quantidade de calor transferido para o motor Stirling e minimizar as perdas térmicas. Dentro da cavidade do receptor encontra-se o absorvedor, que consiste em uma malha de tubos que conduzem o gás do trabalho no motor Stirling. (Mohamed et al., 2011).

Os receptores utilizados nos sistemas Dish/Stirling de alta temperatura são de tipo cavidade, em que a radiação concentrada entra através de uma abertura (localizado no foco do parabolóide) incidindo posteriormente no absorvedor (Nepveu et al., 2009). Existem dois tipos de receptores utilizados em sistemas Dish/Stirling:

1. Receptores de tubos de iluminação direta (DIR): Consiste de um feixe de tubos finos, com cerca de 3 mm de diâmetro, como é mostrado na figura 2.10; onde circula o fluido do trabalho do motor (hélio, hidrogênio ou ar) altamente pressurizado (5-20 MPa). A radiação incide diretamente sobre os tubos, transformando-a em energia térmica, mantendo a temperatura de trabalho entre 650 °C e 850 °C (Nepveu et al., 2009).

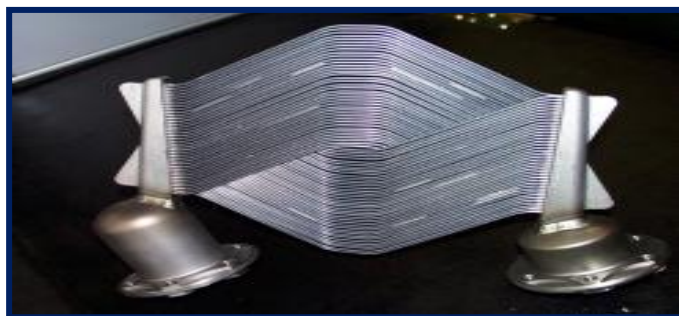


Figura 2.10 Receptor tipo DIR (Bergermann e GbR, 2001)

2. Receptores de refluxo: Utilizam um fluido intermediário (geralmente de sódio) para a transmissão de calor, o fluido é evaporado na superfície do absorvedor e condensado quando ocorre a transferência de calor ao fluido de trabalho no motor Stirling (Bergermann e GbR, 2001). Estes receptores apresentam algumas vantagens:

- ✓ Capacidade de transferência de calor elevada (800 W/cm^2), permitindo o desenvolvimento de receptores menores.
- ✓ Mediante a condensação do metal líquido ocorre um aquecimento uniforme do fluido de trabalho, permitindo uma operação com temperaturas máximas perto da máxima admissível para os materiais.
- ✓ Permite o projeto independente do receptor e motor.

Existem dois tipos de receptores de refluxo:

- Receptor tipo “Pool Boiler”; possui um metal líquido em constante contato com a superfície do absorvedor, onde é produzida a evaporação do metal líquido e logo é condensado nos tubos de aquecimento do motor quando entrega calor (Andraka et al., 1990).
- Tubos de calor “Heat Pipe”; conformado por uma superfície absorvedora, que possui um metal líquido que ao ser aquecido sobe por forças capilares através dos tubos localizados na parte de trás do absorvedor, onde é evaporado. O vapor se move até o aquecedor do motor, onde é condensado e cai novamente à superfície do absorvedor, repetindo novamente este processo (Diver et al., 1990). A figura 2.11, apresenta-se um receptor de tipo Heat Pipe acoplado ao motor Stirling de configuração pistão livre.

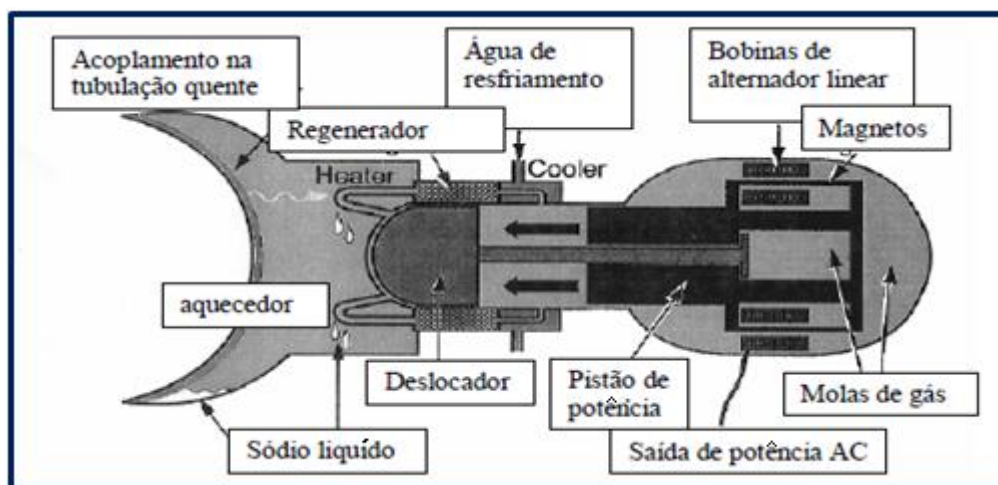


Figura 2.11 Esquema do funcionamento de um receptor tipo Heat Pipe (Diver et al., 1990).

2.3.2 Tecnologias de geração utilizando Dish/Stirling no mundo

Países como EUA, Alemanha, Japão, Espanha, Rússia, etc., estão desenvolvendo programas para aplicações solares visando obter tecnologias e materiais de longa vida (aproximadamente 20 anos). As primeiras experiências com sistemas Dish/Stirling foram realizadas na plataforma solar de Almería “PSA” em Espanha (Casals, 2001). Atualmente a empresa SES se dedica ao mercado dos EUA com plantas de 500-800 MW, além de ser o fabricante exclusivo do sistema Dish/Stirling “SunCatcher”, a última inovação em usinas termo solares que será discutida mais adiante (Casals, 2001). A evolução das tecnologias Dish/Stirling é descrita a seguir:

2.3.2.1 Sistema Vanguard de Avanco

Os sistemas Vanguard 1 foram construídos pela empresa Avanco no Rancho Mirage, no sul de Califórnia nos EUA, entre (1982-1985). Estes sistemas solares estavam formados por configurações no coletor de vidro/metal com 336 espelhos na superfície do coletor; apresentando um elevado nível de concentração solar de 2800 soles no receptor de tipo DIR (Direct-Illumination Receivers) de 20 cm de diâmetro de abertura. Para este tipo de receptor foram feitos testes em laboratórios, para diferentes condições de aquecimento tentando aperfeiçoar o projeto. A figura 2.12 mostra a configuração do receptor tipo DIR onde a configuração geométrica na entrada do receptor é um cone de material cerâmico (Stine e Diver, 1994).

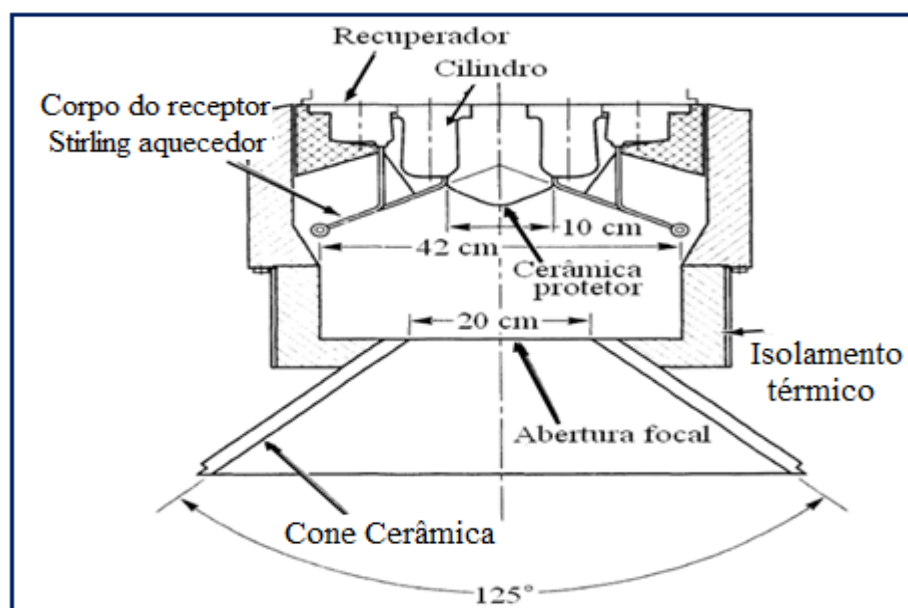


Figura 2.12 Receptor usado no sistema Vanguard I (Stine e Diver, 1994)

O sistema solar tem um motor/gerador de 25 kWe, modelo 4-95 Mark II de United Stirling, que utiliza como gás de trabalho hidrogênio ou hélio com pressão máxima de 20 MPa à temperatura de operação de 720 °C (Mancini, 1997). Este sistema solar mostrado na figura 2.13 operou por 18 meses, devido à falhas mecânicas. Também apresentou excesso de ruído, vibração e fugas de hidrogênio no sistema. Apesar desses problemas o sistema alcançou 29,4% de eficiência e foi operado por cerca de 2.000 horas durante 18 meses (Poullikkas et al., 2010).



Figura 2.13 Sistema Advanco Vanguard. (CIEMAT, 2009)

2.3.2.2 Sistema SBP-1984 “Schlaich, Bergermann and Partner”

Em 1984 foram construídos dois grupos de concentradores Stirling de 50 kWe na Arábia Saudita pela SBP de Stuttgart (Kalogirou, 2004). O coletor tinha o diâmetro de 17 metros, com a tecnologia de membrana esticada de aço inoxidável e espessura de 0,5 mm. Este sistema tem uma estrutura que permite altas concentrações de radiação solar na cavidade do receptor. Para alcançar alta durabilidade na refletividade é sobreposta uma membrana de vidro fino. Os receptores são tipo DIR de aquecimento direto, mostrado na figura 2.14 e um motor (4-275) de United Stirling; este receptor absorve a radiação solar concentrada e aquece o gás hélio do motor Stirling, que através de um gerador é transformada em energia elétrica. (Poullikkas et al., 2010).

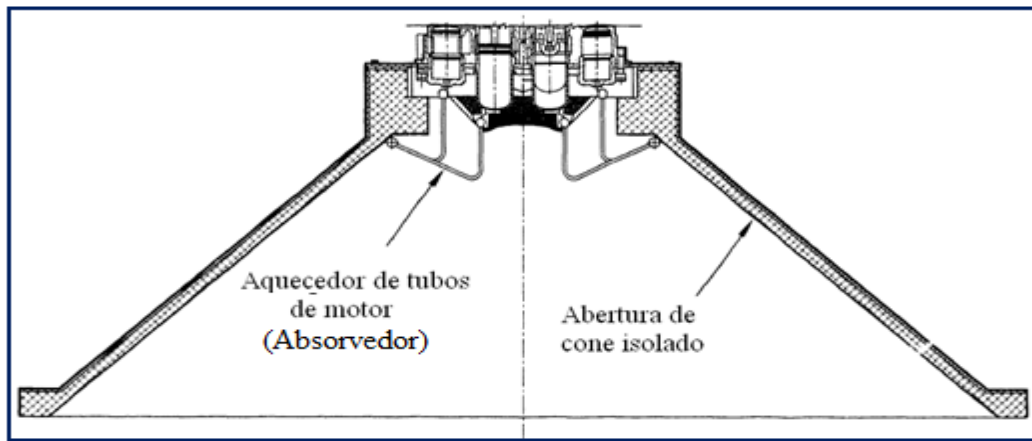


Figura 2.14 Receptor do sistema SBP (Arábia Saudita) (Stine e Diver, 1994)

A figura 2.15 mostra as unidades Disco/Stirling colocadas no deserto da Arábia Saudita, os quais tiveram problemas devido às partículas de poeira, afetando a superfície do vidro dos coletores na forma de arranhões, alterando o fator de reflexão especular (superfície bastante polida).

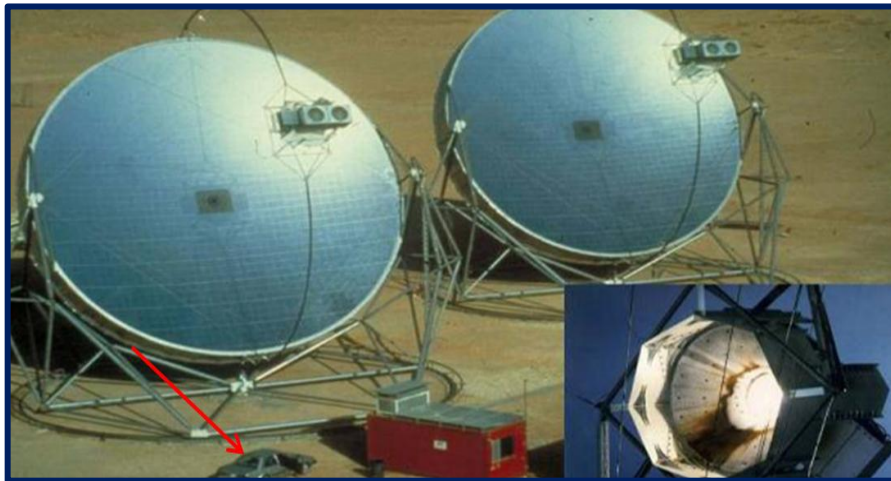


Figura 2.15 Disco/Stirling de 50 kWe na Arábia Saudita (Geyer, 2007)

2.3.2.3 Sistema MDAC/SES

Este sistema Dish/Stirling de 25 kWe foi construído pela McDonnell Douglas Corporation em 1985 para a "Aerospace Corporation (MDAC)" na Califórnia, EUA. Foi o primeiro sistema projetado para ser um produto comercial. O sistema tinha um prato de 10,57 m de diâmetro, a superfície foi projetada com 82 placas de vidro/metal de 91 X 122 cm (Poullikkas et al, 2010).

O sistema de concentração solar era composto de um receptor de irradiação solar direta num motor Stirling Mark II 4-95, que utiliza hidrogênio como fluido de trabalho e

atingindo temperatura de 720 °C. Este sistema tinha um máximo de eficiência Solar/Elétrica entre 29 e 30% (Stone, et al, 1997)

2.3.2.4 Sistema SBP-1989

Em 1989 a SBP “Schlaich Bergermann auf Partner” construiu seu primeiro grupo Disco/Stirling de 7,5 m de diâmetro, incorporando uma membrana esticada feita em aço inoxidável de 0,23 mm de espessura, este sistema tem um tambor que é montado numa estrutura que permite rastreamento sobre o eixo polar da terra, com correções para alterações no ângulo de inclinação (Poullikkas et al, 2010).

A figura 2,16 mostra o sistema SBP na Plataforma Solar de Almería em Espanha, que utiliza um motor Stirling SOLO V-160 de 9 kW e hélio como fluido de trabalho. Sua potência é controlada pela variação da pressão do gás entre 4-15 MPa à 630 °C. O motor tem uma eficiência de 30% e uma eficiência de conversão Solar/Elétrica de 20,3% (Stine e Diver, 1994).



Figura 2.16 Sistemas Concentrador/Stirling fabricado por SBP 1989 (Geyer, 2007)

2.3.2.5 Sistema CPG

Durante o período entre 1991 e 1996 a Cummins Power Generation (CPG), junto ao departamento de energia dos Estados Unidos desenvolveu dois tipos de sistemas Dish/Stirling de 7 kWe e 25 kWe de potência. O sistema de 7,5 kWe usou um coletor de 7,3 m de diâmetro, composto de uma estrutura de várias placas de vidro contínuo, onde os vértices coincidem com a superfície de uma esfera, como é apresentado na figura 2.17 (Poullikkas et al, 2010). A

unidade de acompanhamento solar para este sistema é de eixo polar. O receptor usa tubos de calor com metal líquido neste caso sódio, no qual o metal passa por transformações de evaporação e condensação nos tubos do aquecedor do motor Stirling (Stine e Diver, 1994).



Figura 2.17 Sistema CPG de 25 kWe (Dracke e De Laquil III, 1996)

O projeto de 25 kWe começou em 1994, o prato foi projetado para fornecer cerca de 120 kW de potência térmica no receptor. O motor Stirling selecionado para este sistema foi o Aisen Seiki japonês de dupla ação com 4 cilindros em linha e potência nominal de 23 kWe, operando com hélio como gás de trabalho e controle de pressão para regular a potência. (Poullikkas et al., 2010).

O sistema CPG, de 25 kWe operou por um curto período de tempo na primavera de 1996 usando um receptor de tipo heat pipe e produziu uma potência de 22 kWe durante a operação. Devido ao alto custo das tecnologias e alta manutenção o projeto CPG foi fechado e vendido a uma companhia chamada Kombassan Alanya, Turquia. (Newton, 2007)

2.3.2.6 Projeto Distal I

O projeto Distal I, localizado em Almeria-Espanha, entrou em operação em 1992 com três unidades Dish/Stirling de 7,5 m de diâmetro (Poullikkas et al., 2010). Este sistema é capaz de concentrar no interior da cavidade focal até 40 kWt, aquecendo um gás de trabalho (hélio) no motor Stirling SOLO V160 de duplo cilindro 90° em “V” que pode gerar até 9 kWe (CIEMAT, 2009).

O protótipo foi projetado utilizando a tecnologia de espelhos de membrana esticada de metal, que mantém a forma parabólica com uma pequena bomba de vácuo como um tambor, como é observado na figura 2.18. A refletividade é de 94% e é capaz de concentrar a luz solar

até 12000 vezes no centro de seu foco num receptor de 12 cm de diâmetro (Stine e Diver, 1994). Duas unidades de Distal I foram desmontadas no ano 2000, para serem substituídas por unidades EURODISH de terceira geração (CIEMAT, 2009).



Figura 2.18 Distal I coletor solar de membrana esticada (CIEMAT, 2009)

2.3.2.7 Projeto Distal II

Como uma primeira tentativa de obter um melhor desempenho e menor custo por kWe, o projeto Distal II foi desenvolvido nos anos 1996 e 1997. Instalados e colocados em operação três novos sistemas Dish/Stirling baseados também na tecnologia de membranas esticada como é observada na figura 2.19. (Poullikkas et al., 2010).

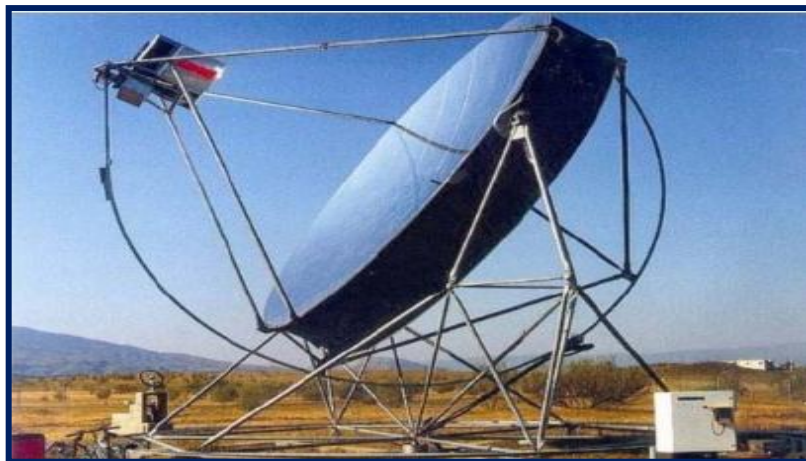


Figura 2.19 Distal II coletor solar de membrana esticada (CIEMAT, 2009)

Estes protótipos têm diâmetros ligeiramente maiores que 8,5 m que fornecem energia térmica ao receptor do motor de 50 kWt. Sua distância focal é de 4,1 m e a concentração máxima é de 16000 soles no centro do foco. Observa-se que a evolução deste sistema em

comparação com o anterior consistiu em maximizar a concentração, modificando a relação distância focal/diâmetro “f/D”, de 0,6 para 0,482. Também foi mudado o sistema de rastreamento solar por um Azimute/Elevação de operação automática. Outra mudança foi usar a evolução do motor Stirling, neste caso o motor foi o V161 de 10 kWe. (CIEMAT, 2009).

2.3.2.8 EuroDish

O sistema Eurodish (1998-2001) de 10 kW de geração de energia descentralizada foi financiado parcialmente pela União Europeia, com o objetivo de reduzir os custos na fabricação, instalação, operação e manutenção. Este sistema incorpora um concentrador parabólico de 8,5 m de diâmetro, composto de resinas “epoxy” reforçada com fibra de vidro. Seu sistema de rastreamento é de tipo Azimute/Elevação. O motor Stirling usado foi o SOLO 161 com capacidade de 10 kWe (Keck e Schiel, 2003). Finalmente este sistema Eurodish é integrado entre os anos 2002 e 2004 ao projeto Envirodish que é financiado pelo ministério de médio ambiente Alemão e um consórcio de empresas, entre as quais estão Schlaich Bergermann and Stuttgart, SOLO Kleinmotoren GmbH, Almeria, etc. Onde o objetivo é expandir sua tecnologia em diferentes países para baixar os custos de produção, montagem e obter dados sobre o funcionamento do sistema em geral. (Keck e Schiel, 2003).

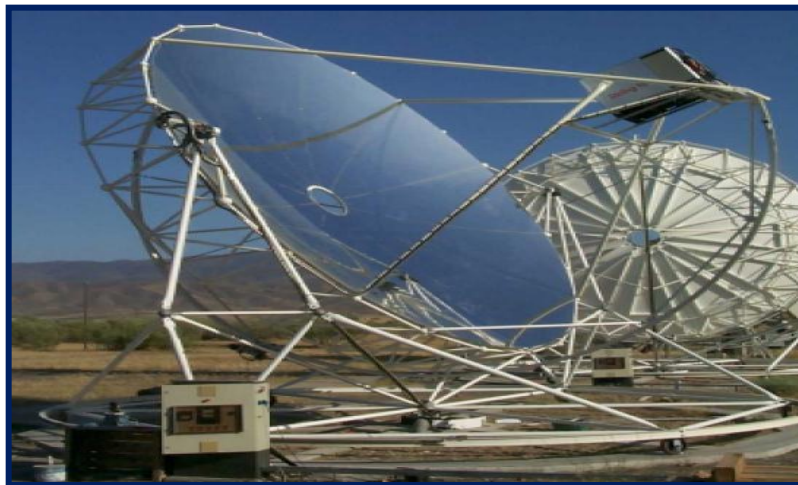


Figura 2.20 Sistema EuroDish de 10 kWe (Keck e Schiel, 2003)

A figura 2.20 mostra o novo protótipo que foi projetado e construído para atender as seguintes finalidades (Bergermann e GbR, 2001):

- ✓ Redução do preço dos componentes, identificando os elementos padrão utilizados na indústria.

- ✓ Desenvolvimento de um novo sistema de fabricação para o coletor. Este foi construído pelo Composite, empresa distribuidora de fibra de vidro, resinas plásticas termo fixas, reforços de vidro, carbono etc. deixando de lado a tecnologia de membrana esticada.
- ✓ Melhora do motor Stirling SOLO V161, especialmente os componentes utilizados na cavidade que recebe a energia solar concentrada.

2.3.2.9 Sistema SAIC

Em 1993, a Science Applications International Corporation (SAIC) e Stirling Motores Térmicos (STM) (DeMeo e Galdo, 1997), desenvolveram um sistema para aplicações em escala comercial mostrado na figura 2.21. Em Golden, Colorado, EUA, foi demonstrado a fase 1, com uma unidade SAIC/STM de 20 kWe. Nesta fase, foram usados 16 espelhos circulares de vidro, com espessura de 0,7 mm, o que dificultou o trabalho devido à sua fina espessura (DeMeo e Galdo, 1997). O sistema de rastreamento utilizado foi o Azimute/Elevação, com um motor Stirling, que tem um receptor tipo DIR (SANDIA, 2001).

Na segunda fase o objetivo foi aumentar o diâmetro das facetas refletoras e sua espessura à 1,0 mm, utilizando um material com baixo teor de ferro. O receptor utilizado é tipo DIR de segunda geração “Hybrid” (SANDIA, 2001) e um motor Stirling de dupla ação tipo STM 4-120 de terceira geração.



Figura 2.21 Protótipo construído pela SAIC e STM “Sistema Disco-Stirling fase 1 e fase 2”. (SANDIA, 2001)

Na terceira fase deste tipo de sistema SAIC/STM, está prevista uma etapa pré-comercial com o desenvolvimento de um campo de cerca de 2 MW com 80-100 unidades Dish/Stirling

localizado no Estado do Novo México, Estados Unidos, para efeitos de testes e avaliação de longo prazo do sistema (DeMeo e Galdo, 1997).

2.3.2.10 Concentrador Solar parabólico do ANU

O ANU "Australian National University" construiu o primeiro protótipo dos concentradores solares de 400 m² chamado "Big Dish", o qual foi concluído em 1994. A pesquisa e desenvolvimento deste projeto esta sendo destinada para apoiar e melhorar a tecnologia solar. Em 2005, a Wizard Power Pty Ltd, foi criada para levar a tecnologia Big Dish à implantação comercial (Johnston, 1995). A estrutura de rastreamento solar é baseada no tamanho do disco, utilizando um sistema de controle Altitude/Azimute, proporcionando uma concentração de 1500 soles. Este sistema funciona com uma caldeira localizada no receptor que produz 1000 g/s de vapor que é superaquecido até 500 °C e 4,5 MPa e é conduzido por uma tubulação da estrutura do sistema, até um Motor/Gerador (Lovegrove et al., 2007).



Figura 2.22 Protótipo Big Dish no campus ANU (Lovegrove et al., 2007)

Mais tarde em 2008, foi construído o maior concentrador do mundo de 500 m², como se mostra na figura 2.22, com comprimento focal de 13,4 m utilizando também um sistema de controle Altitude/Azimute, este protótipo utiliza 380 espelhos esféricos idênticos de vidro laminado com baixo conteúdo de ferro, cada um com 1,17 m x 1,17 m e valores de refletividade entre 86-93,5% (Lovegrove et al., 2009). Um novo sistema de 500 m² atingiu um nível satisfatório de concentração solar, indicando que até 95% da radiação solar que chega o coletor pode ser capturada dentro de um diâmetro de abertura do receptor de 500 mm, com uma concentração superior a 2000 vezes a intensidade da luz solar (Lovegrove et al., 2009).

2.3.3 Comparação das tecnologias solares térmicas

Existem outras tecnologias alternativas para a conversão do componente direto da radiação solar em energia elétrica. Entre as diferentes tecnologias solares distinguem-se os sistemas termo solares de concentração (Cilíndricos parabólicos, Torre Central, Disco/Stirling), que são comparados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Comparação de tecnologias solares térmicas (Kaltschmitt et al., 2007)

	Receptor central	Prato parabólico	Cilindro parabólico
Aplicação	Centrais ligadas à rede "Geração Centralizada".	Aplicações autônomas ou pequenos sistemas de geração distribuída.	Centrais ligadas à rede "Geração Centralizada".
Situação	Experiência operacional dos primeiros protótipos.	Experiência operacional dos primeiros protótipos.	Comercialmente disponível-mais de 10.000 milhões de kWh de experiência operacional. Os custos de investimento e de operação comercialmente comprovada.
Vantagens	Alta eficiência e fator de alta capacidade. Operação híbrida possível	Alta eficiência de conversão. Operação híbrida possível	Operação híbrida possível
Desvantagens	Alto investimento	Altos custos de investimento	O uso de óleos como meios de transferência de calor, restringe as temperaturas de operação (400 °C) Grandes áreas de instalação e da água
Potência	10-200MW	5- 25 kW	30-320 MW
Temperatura de operação	565-1000 °C	750-900 °C	390 °C
Eficiência máxima	23%	29-31%	20%
Risco tecnológico	Médio	Alto	Baixo
Armazenamento	Armazenamento em altas temperaturas	Baterias	Baixo

2.3.4 Perspectivas para tecnologias solares térmicas

As tecnologias solares térmicas são relativamente novas e mostram um grande potencial, tendo a vantagem sobre outras tecnologias de baixo impacto ambiental. Existem atualmente 1200 MW de CSP em vigor nos EUA, o que o torna o maior mercado de energia solar depois da Espanha. O mercado dos EUA tem agora o maior volume de projetos de CSP em fase de construção no mundo, como Ivanpah, Solana, Tonapah e o Rice Project. As

companhias líderes em desenvolvimento tecnológico solar que estão por trás desses projetos são Abengoa, BrightSource Energy, SolarReserve (Gonzalez, 2012).

Em 2010, Tessera Solar e Stirling Energy Systems lançaram o primeiro projeto-piloto de CSP Stirling na central Maricopa, próximo a Phoenix, Arizona-EUA, devido aos verões quentes, clima desértico rígido e deficiência hídrica. Esta planta solar consta de 60 discos solares SunCatcher, com uma capacidade de gerar 1,5 MW. A vantagem deste sistema solar é que não usa água para gerar eletricidade, apenas uma quantidade mínima para operações da instalação e para a limpeza dos espelhos (Gonzalez, 2012).

Luis Crespo (Secretário Geral e Presidente da Protermosolar e Estela) indicou que "a indústria solar hoje está perto de 2 GW instalados no mundo inteiro e outros 2 GW para ser instalado a curto prazo na Europa (Gonzalez, 2012).

A geração de eletricidade a partir de energia solar mostra sustentabilidade ambiental, já que avaliações de emissões produzidas no ciclo de vida e os impactos no terreno onde estão localizados mostram que são apropriados para reduzir o efeito estufa e outros poluentes (Greenpeace, 2009).

Para entidades como Greenpeace internacional e a Associação Europeia da indústria solar térmica, a situação para o ano 2020 pode ser excelente se as condições do mercado forem apropriadas, os avanços tecnológicos esperados e o aumento do número de países interessados em aplicar políticas ambientais a fim de apoiar estas tecnologias. A seguir, cita-se as perspectivas esperadas para o futuro (Greenpeace, 2009):

- ✓ Em 2015 a capacidade total instalada de usinas termo solar terá alcançado 5.000 MW.
- ✓ Em 2020 a capacidade adicional estaria crescendo quase 4.500 MW por ano.
- ✓ Em 2020, a capacidade total instalada de energia solar no mundo atingirá 21.540 MW.
- ✓ A energia solar térmica chegará a uma produção anual de mais de 54.600.000 MWh (54,6 TWh). Isto é equivalente a mais de um terço da demanda de eletricidade da Austrália.
- ✓ Durante o período até 2020 seria evitada a emissão de 154 milhões de toneladas de dióxido de carbono à atmosfera, o que significaria uma importante contribuição para as metas internacionais de diminuição da poluição ambiental.

Tabela 2.4 Especificações de projeto dos sistemas Disco/Stirling (Stine e Diver, 1994)

SISTEMA SOLAR	AVANCO VANGUARD	ARÁBIA SAUDITA (SBP -1984)	MDAC/SES	SISTEMA SBP- 1989	SISTEMA CPG
Operação do sistema					
Potência Elétrica kW	25	52,5	25	9	7,5
Eficiência	29,4 %	23,1%	29 -30%	19%	19 %
Radiação solar W/m ²	1000	1000	1000	1000	1000
Saída (térmica) kWt	62	142,6	-	31,1	42
Concentrador					
Diâmetro do coletor m	10,57	17	10,57	7,5	7,3
Área do projeto m ²	86,7	227	87,7	44,18	43,8
Angulo de borda	45 ⁰	39 ⁰	39 ⁰	39 ⁰	-
Distância focal m	-	13,6	7,45	4,5	5,38 m
Relação Focal f/d	0,6	0,8	0,7	-	-
Refletividade	93,5%	92%	91%	94%	78% -85%
Eficiência ótica	89%	78,7 %	88,1 %	82 %	78%
Fator de interceptação	-	90%	-	90%	-
Número de Facetas	336	1	82	1	24
Concentração	2800	600	2793	4000	1670
Monitoramento e controle					
Seguimento	Azimute/Elevação	Azimute/Elevação	Azimute/Elevação	Acionamento Polar	Azimute/Elevação
Máx velocidade do vento permitida	14 m/s	16 m/s	14 m/s	15,6 m/s	14 m/s

Tabela 2.5 Especificações de projeto dos sistemas Disco/Stirling (Stine e Diver, 1994)

SISTEMA SOLAR	ADVANCO VANGUARD	ARÁBIA SAUDITA (SRP-1084)	MDAC/SES	SISTEMA SBP-1989	SISTEMA CPG
Receptor					
Tipo	Tubo aquecedor diretamente iluminado.	Tubo aquecedor diretamente iluminado.	Tubo aquecedor diretamente iluminado.	Tubo aquecedor diretamente iluminado.	Tubo aquecedor diretamente iluminado.
Eficiência Térmica do receptor	90%	80%	90%	86%	86%
Diâmetro absorvedor mm	450	700	-	-	416
Diâmetro do receptor mm	200	700	200	120	178
Fluxo pico (superfície absorvedor) W/cm ²	75	50	75	80	30
Potência de entrada térmica (Max.) kW	74	179	-	36,2	-
Temperatura normal de funcionamento °C	720	720	-	750	-
Temperatura de operação de gás °C	760	620	-	630	675
Max. Temperatura do tubo (front-side) °C	810	800	-	850	-
Motor Stirling					
Potência kW	25	50	25	9 -15	9
Número de cilindros	4 em paralelo	4 paralelo	4 em paralelo	2	1
Stirling configuração	4 (pistões, de dupla ação)	4 pistões de dupla ação	4 (pistões, de dupla ação)	Duplo cilindro 90 V	Pistão livre de potência
Gás de trabalho	Hidrogênio (hélio opcional)	Hidrogênio	Hidrogênio (hélio opcional)	Hélio	Hélio
Temperatura gás (alta) °C	720	620	720	630	629
Temperatura de refrigeração (Max) °C	50	65	50	-	-
Eficiência Max.	41%	42%	41%	30%	33%
Pressão máxima do fluido do trabalho MPa	20	15	20	15	4

Tabela 2.6 Especificações de projeto dos sistemas Disco/Stirling (Stine e Diver, 1994)

SISTEMA SOLAR	AISIN/ MIYAKO	DISTAL I	EURODISH	SISTEMA SAIC	SUNCATCHER
Operação do sistema					
Potência Elétrica kW	8,5	9	10	22	25
Eficiência	16 %	-	-	24,3%	31,25%
Radiação solar W/m ²	1000	1000	1000	1000	1000
Saída (térmica) kWt	35	40	-	-	-
Concentrador					
Diâmetro do coletor m	7,5	7,5	8,5	14	-
Área do projeto m ²	44	44	56,7	113	87,67
Angulo de borda	-	-	-	-	-
Distância focal m	-	4,5	4,5	-	-
Relação Focal f/d	-	-	-	-	-
Refletividade	85%	94%	94%	90%	91%
Eficiência ótica	78%	-	82%	95%	-
Fator de interceptação	-	-	-	-	-
Número de placas	-	1	-	16 Espelhos	82
Concentração	1540	3000	2500	2000	750

Tabela 2.7 Especificações de projeto dos sistemas Disco/Stirling (Stine e Diver, 1994)

SISTEMA SOLAR	AISIN/ MIYAKO	DISTAL I	EURODISH	SISTEMA SAIC	SUNCATCHER
Receptor					
Tipo	-	-	.	DIR + Queimador Híbrido (UNLV SOLO DIR)	PCU
Eficiência Térmica do receptor	65%	-	86%	-	-
Diâmetro absorvedor mm	320	120	260	-	-
Diâmetro do receptor mm	185	-	180	-	-
Fluxo pico (superfície absorvedor) W/cm ²	-	-	-	-	-
Potência de entrada térmica (Max.) kW	53	-	-	-	-
Temperatura normal de funcionamento °C	750	-	727	-	-
Temperatura de operação de gás °C	683	-	-	-	-
Max. Temperatura do tubo (front-side) °C	780	-	-	-	-
		-		-	
Motor Stirling					
Potência kW	8,5	9	8,4	30	27
Número de cilindros	4	2	4	4	-
Stirling configuração	Dupla Ação	Duplo Cilin. 90°V	Simples efeito	Dupla Ação	-
Gás de trabalho	Hélio	Hélio	Hélio	-	Hidrogênio
Temperatura gás (alta) °C	683	630	650	720	720
Temperatura de refrigeração (Max) °C	50	-	-	-	-
Eficiência Max.	25%	30%	32%	42%	38-42 %
Pressão máxima do fluido do trabalho MPa	14,5	15	-	-	20

2.4 INDICADORES TECNOLÓGICOS

Os indicadores selecionados correspondem aos critérios de projeto, com a finalidade de fornecer informações sobre as prioridades no desenvolvimento e comportamento tecnológico. Os Indicadores exigem um rigoroso processo de seleção que devem representar informações de boa qualidade, relevância no aporte do propósito que pretende ser mostrado e resultados devidamente contextualizados e descritos (Quiroga, 2009).

Para identificar os indicadores que servem como critério de comparação das tecnologias descritas anteriormente, foi realizado uma análise dos aspectos teóricos e práticos de cada tecnologia Dish/Stirling. Para realizar esta análise foi considerada uma irradiação solar comum de 1000 W/m², o que implica que valores de eficiência, potência elétrica e potência térmica são referenciados a este valor. Os indicadores identificados para o estudo de comparação de cada sistema solar são:

- Concentração geométrica
- Capacidade de geração de energia elétrica por unidade de área do coletor
- Capacidade de geração térmica por unidade de área do receptor
- Capacidade de geração térmica versus Capacidade de geração de eletricidade
- Distribuição das eficiências em cada estágio do sistema solar

2.4.1 Concentração geométrica

Os sistemas solares Dish/Stirling descritos nas tabelas 24, 2.5, 2.6 e 2.7, são caracterizados por terem diferentes dimensões como é apresentado na figura 2.23. Esta figura mostra a razão de concentração geométrica, barra sombreada, definida como a razão entre a área do Coletor/Receptor ou pela razão entre os diâmetros ao quadrado do Coletor/Receptor assumindo as superfícies como circulares.

$$C_{geometrica} = \frac{D_{colector}^2}{D_{receptor}^2} \quad (2-9)$$

A temperatura do receptor depende diretamente da capacidade de concentração geométrica, mas existem outros fatores que influenciam:

- Variação da irradiação solar;
- Absorbância do material receptor;
- Emissividade;
- Fator de interceptação;
- Fator de reflexão;
- Fator de sombra;
- Configuração geométrica.

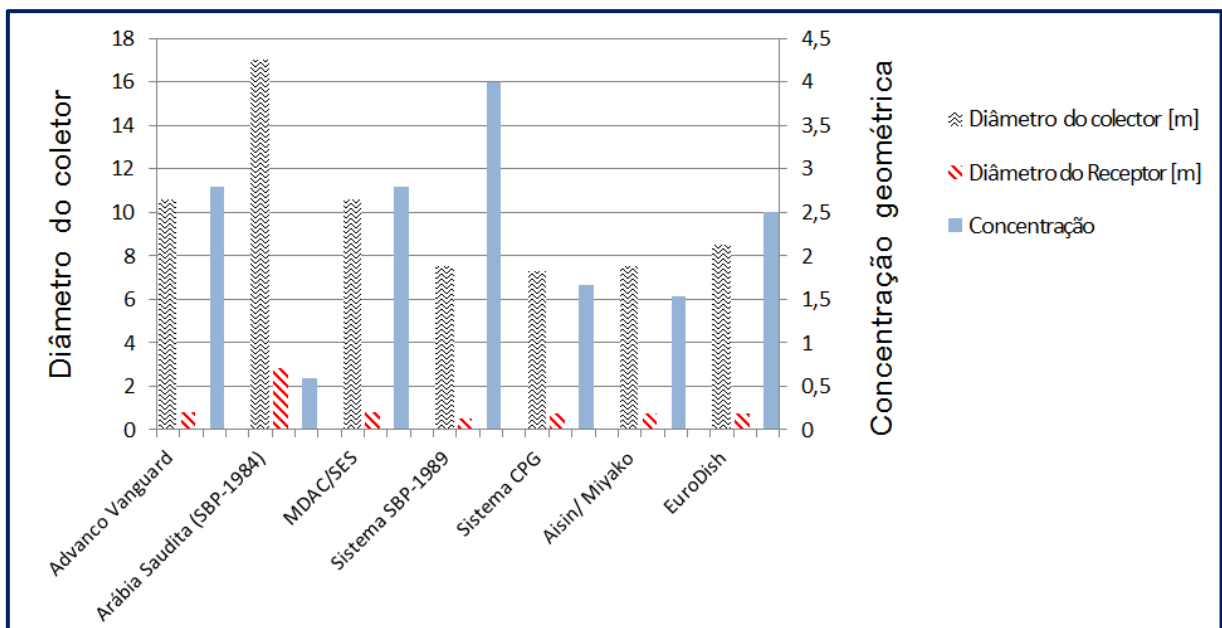


Figura 2.23 Relação de concentração geométrica

A figura 2.23 mostra que:

- ✓ O sistema instalado na “SBP” Arábia Saudita 1984 é a tecnologia com maiores dimensões no diâmetro do Coletor/Receptor, devido ao seu alto potencial de geração de eletricidade, mas tem uma baixa relação de concentração geométrica com respeito a outras tecnologias.
- ✓ O sistema SBP tem a concentração geométrica mais elevada, devido à alta relação diâmetro do coletor, diâmetro do receptor.
- ✓ A concentração pode ser considerada como um indicador da eficiência ótica, já que o calor concentrado na cavidade do receptor depende da capacidade do espelho refletor e de seu tamanho.

Em conclusão, a concentração geométrica é apenas um indicador da capacidade de um sistema solar para concentrar energia térmica na cavidade do receptor.

2.4.2 Capacidade de geração de energia elétrica por unidade de área.

A geração de eletricidade a partir da radiação solar depende das limitações da tecnologia e da disponibilidade de energia solar. Na figura 2.24 apresenta-se a capacidade de geração de potência elétrica para as diferentes tecnologias Dish/Stirling:

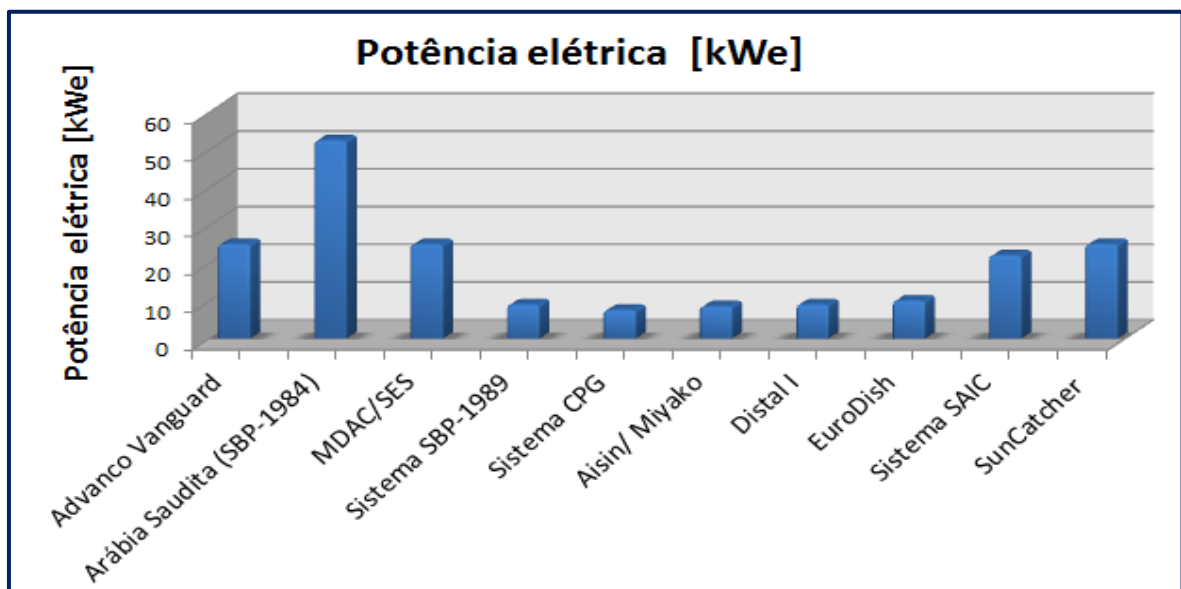


Figura 2.24 Geração de potência elétrica para (1000 W/m²)

A figura 2.24 mostra que:

- O sistema instalado na Arábia Saudita “SBP” 1984, apresenta o valor mais alto de potência elétrica 52,5 kWe.
- Observa-se que algumas das tecnologias Dish /Stirling têm uma capacidade instalada de aproximadamente 10 kWe, como: SBP-1989, CPG, Aisin/Miyako, Distal I e EuroDish, Isto é porque a irradiação solar é muito intermitente limitando a capacidade de geração de energia elétrica, além para aumentar a potência eléctrica é necessário grandes dimensões do espelho coletor representando aumentos nos custos da fabricação da tecnologia.

O indicador de densidade de potência elétrica é determinado com base na área total do coletor e representa a potência elétrica gerada por unidade de área de cada sistema solar.

Existem parâmetros que afetam os indicadores tecnológicos e não são evidentes. Alguns destes parâmetros são:

- ✓ Tipo de material que cobre a superfície refletora;
- ✓ Sistema de rastreamento solar;
- ✓ Fator de sombra, decorrente da estrutura que contém o receptor;
- ✓ Capacidade de absorção de calor do fluido de trabalho;
- ✓ Eficiência ótica;
- ✓ Perdas por radiação, convecção e condução.

A figura 2.25, mostra a comparação de energia elétrica por unidade de área de coletor para 10 tecnologias Dish/Stirling.

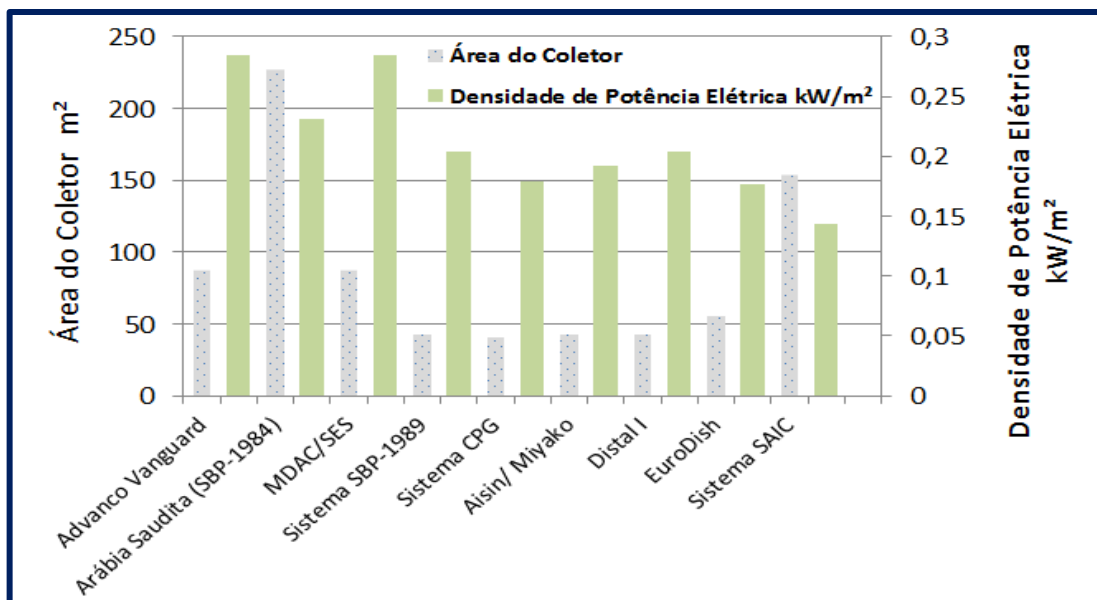


Figura 2.25 Capacidade de geração de potência elétrica por unidade de área de coletor

A figura 2.25 mostra que:

- ✓ O sistema Distal I e Aisin/Miyako têm a mesma área no prato coletor, mas o sistema Distal I apresenta maior densidade de potência.
- ✓ O sistema instalado na “SBP” Arábia Saudita 1984, apesar de ser o maior sistema de geração de potência elétrica, não é o sistema com maior densidade de potência elétrica. Uma razão é que a eficiência ótica do coletor mostrada na tabela 2.5 é baixa em relação a outras tecnologias.
- ✓ Nos sistemas, Distal I, SAIC e SBP, têm valores semelhantes de densidade de potência elétrica. Estes sistemas são caracterizados por terem diferentes configurações

geométricas, mas utiliza a mesma tecnologia de reflexão sobre a superfície do coletor "membrana esticada".

2.4.3 Capacidade de geração térmica por unidade de área

A capacidade de geração térmica está relacionada com a temperatura atingida pelo receptor. A figura 2.26 apresenta a capacidade de geração de potência térmica para as diferentes tecnologias:

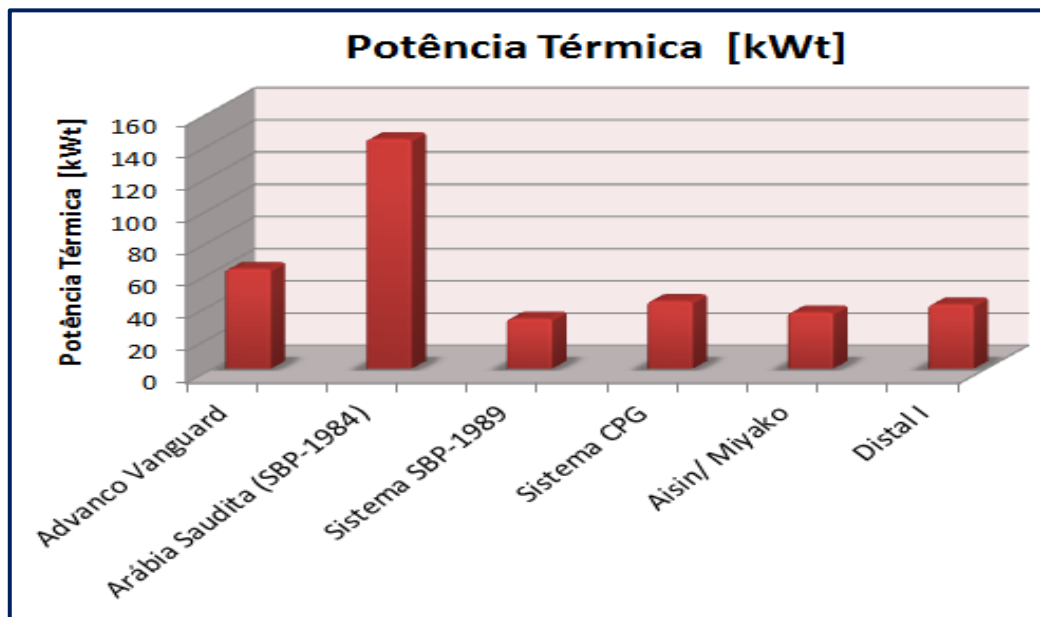


Figura 2.26 Geração de potência térmica para (1000 W/m²)

A figura 2.26 mostra que:

- ✓ O sistema instalado na “SBP” Arábia Saudita 1984, representa o valor mais alto de energia térmica, isto é devido às grandes dimensões do coletor e receptor.

A densidade de energia térmica é determinada com base na área de abertura do receptor e representa a energia térmica captada por unidade de área. Há algumas considerações que são inerentes a esses resultados, que não são evidentes e afetam este indicador. Alguns destes parâmetros são:

- ✓ Fluido de transferência de calor utilizado no receptor (hélio ou sódio);
- ✓ Sistema de Rastreamento solar;

- ✓ Parâmetros de projeto (fator de área sem sombra, configuração geométrica, material utilizado na superfície do receptor, etc.);
- ✓ A área utilizada para os cálculos é a área de abertura do receptor.

A figura 2.27 mostra a potência térmica das tecnologias solares por unidade de área m^2 do receptor:

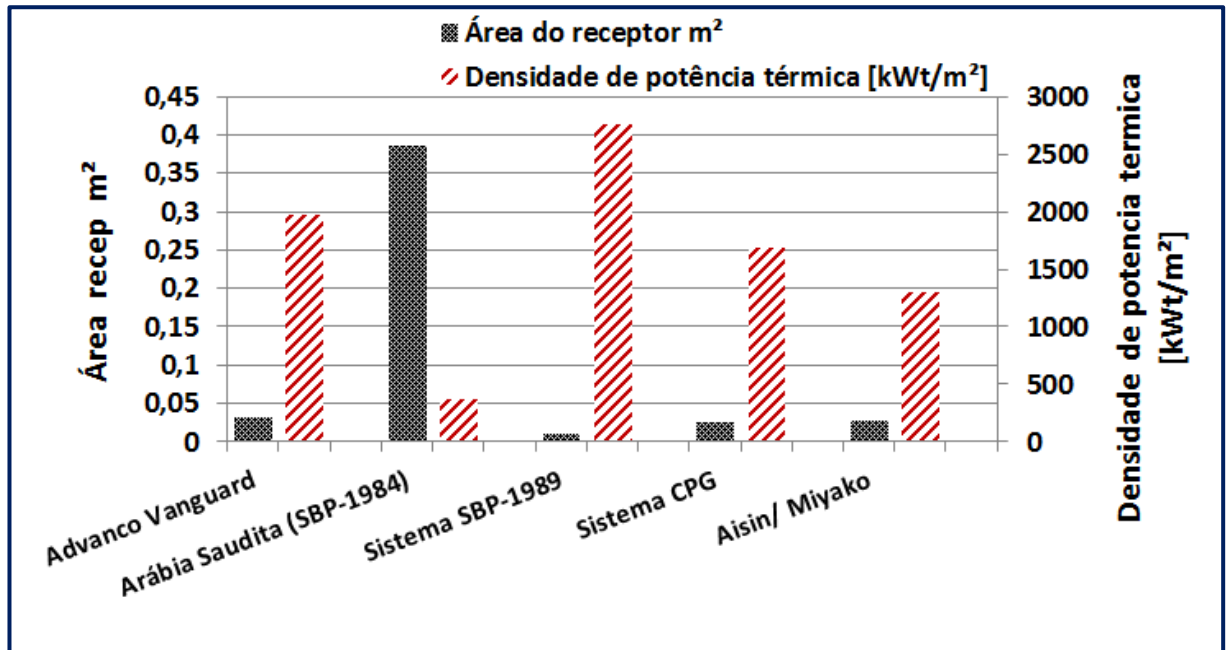


Figura 2.27 Capacidade de geração de potência térmica por unidade de área do receptor

A figura 2.27 mostra que:

- ✓ O sistema instalado na “SBP” Arábia Saudita 1984, fornece a máxima potência térmica no receptor, mas é a tecnologia com menor densidade de potência térmica, Isto é devido às relações de baixa concentração geométrica, baixa eficiência ótica e térmica (valores dados na tabela 2.24).
- ✓ Os aproveitamentos térmicos da maioria dos sistemas estão relacionados com o tipo do receptor, fluido de trabalho, eficiência ótica do sistema, elevadas concentrações geométricas, etc.
- ✓ O sistema Distal I tem a maior densidade de energia térmica, devido a sua elevada concentração térmica e avanços tecnológicos.

2.4.4 Capacidade de geração térmica versus Capacidade de geração de eletricidade

- ✓ Os sistemas Dish/Stirling necessitam de grande quantidade de energia térmica concentrada, para transformá-la em potência elétrica, como é mostrado na figura 2.28. Considerando que a tecnologia Dish/Stirling é a que tem maior eficiência de conversão de energia solar em eletricidade (28-31%), Beta é o parâmetro que caracteriza a tecnologia de geração de energia, dependendo do concentrador.

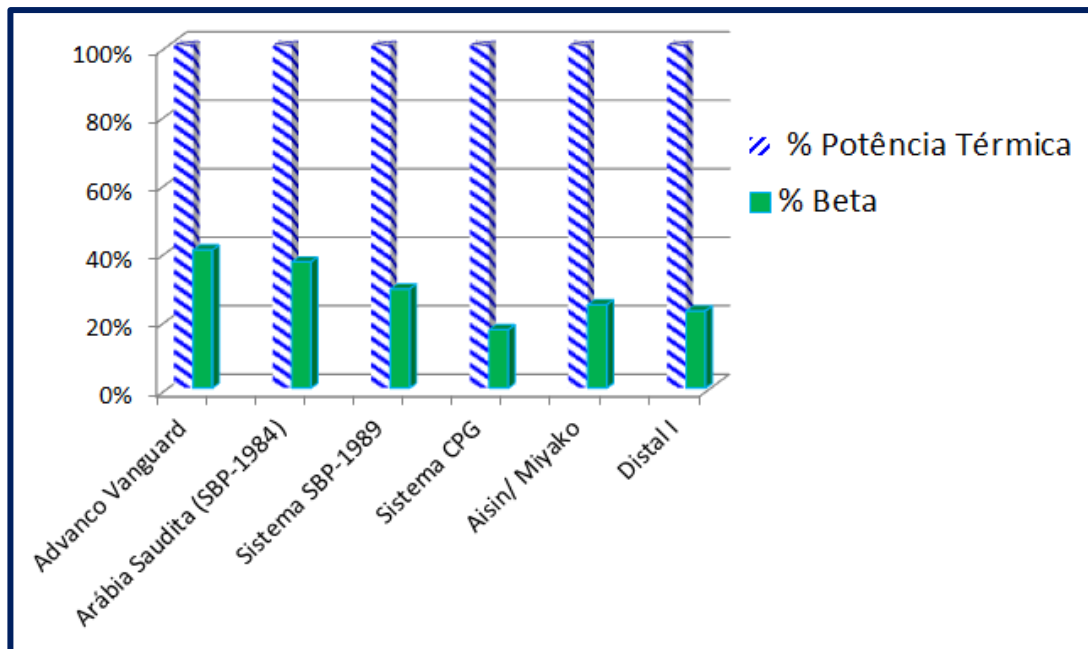


Figura 2.28 Eficiência de transformação de potência térmica em potência elétrica

A figura 2.28 mostra que:

- ✓ O sistema solar CPG tem a menor eficiência de conversão de potência térmica em potência elétrica.
- ✓ Os sistemas Dish/Stirling transformam entre 15 e 40 % da energia térmica em energia elétrica.
- ✓ Em geral a figura 2.28 mostra que os sistemas Dish/Stirling requerem grandes quantidades de concentração de energia térmica para ser transformada em eletricidade.

2.4.5 Eficiências

Para instalações de centrais solares, a produção de eletricidade é limitada por barreiras tecnológicas e altos custos de investimento. Um fator importante no uso de energia é a eficiência ótica que está definida como a irradiação interceptada no receptor sobre a irradiação incidente no coletor. Esta irradiação solar transformada em calor é aproveitada por um fluido de trabalho encarregado de transportá-la ao motor para ser convertida em potência elétrica através de um gerador.

Estes rendimentos dependem de:

- Propriedades dos materiais
- Geometria do coletor
- Imperfeições por processos de fabricação
- Irradiação descontínua
- Incrustações nos espelhos refletores

As eficiências do sistema Dish/Stirling na diferentes etapas são:

- ✓ Eficiência ótica: É dado pelas propriedades do material de fabricação do espelho coletor (alto coeficiente de reflexão) que é a capacidade de refletir a luz solar para um único ponto sem perdas (CIEMAT, 2008).
- ✓ Eficiência do receptor: Definida como a proporção de energia térmica que passa através da abertura da cavidade do receptor e atinge a superfície quente do motor Stirling. As perdas no receptor são dadas por perdas por radiação e convecção (CIEMAT, 2008).
- ✓ Eficiência do motor Stirling: As perdas de energia de um motor Stirling são devidas a processos mecânicos e termodinâmicos. A compressão e a expansão não são adiabáticas. Os trocadores não são ideais porque há perdas de pressão e calor (Losada, 2009).

A figura 2.29, mostra uma análise energética de diferentes sistemas solares Dish/Stirling na conversão de energia solar em energia elétrica, analisando as perdas por etapa do sistema solar.

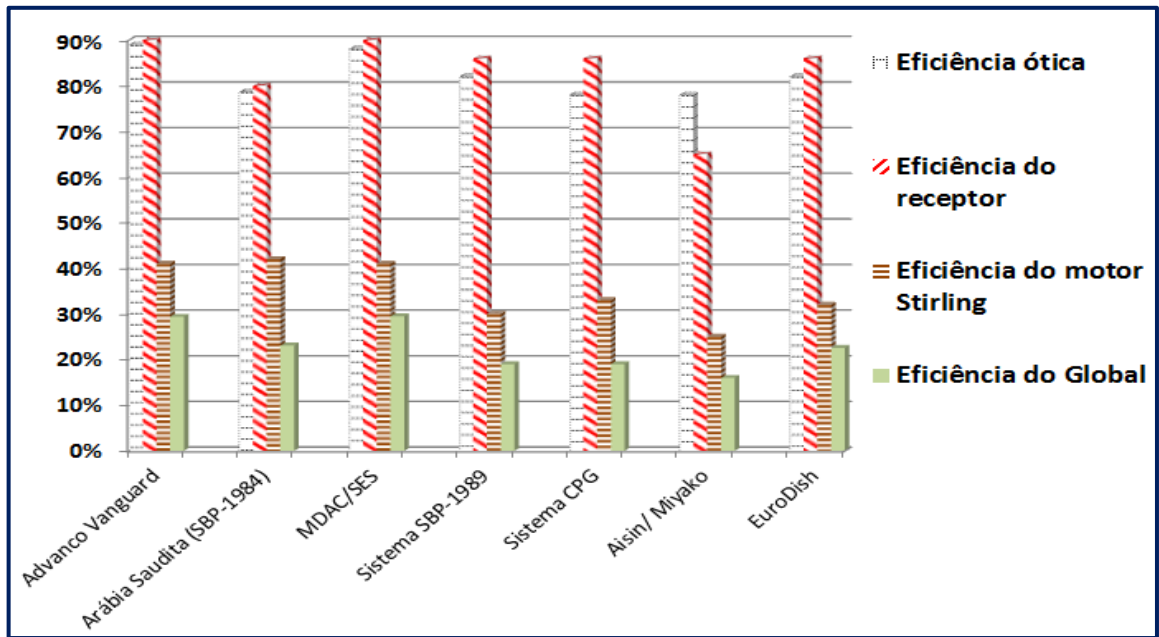


Figura 2.29 Distribuição da eficiência em todo o sistema

A figura 2.29 mostra que:

- ✓ As principais perdas dessas tecnologias ocorrem na fase de conversão de energia térmica em potência mecânica, o que demonstra que a eficiência do sistema é fortemente influenciada pela eficiência térmica do motor.
- ✓ Os sistemas Advanco Vanguard e MDAC/SES apresentam as maiores eficiências em cada etapa do sistema Dish/Stirling, como é mostrado na figura 2.29. As perdas entre a conversão de potência mecânica e energia elétrica são pequenas, isto é devido á eficiência do gerador (94% e 96%) na conversão de energia elétrica.
- ✓ O sistema instalado na “SBP” Arábia Saudita 1984, possui uma baixa eficiência ótica, o que descompensa o sistema para o momento de aproveitar este recurso energético (Irradiação Solar).
- ✓ Em alguns sistemas, não há perda significativa entre eficiência ótica e a eficiência do receptor.

Capítulo 3.

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

3.1 GEOMETRIA SOLAR

Para sistemas térmicos baseados na irradiação solar é importante a realização de um estudo solar no local onde será instalada a tecnologia solar. Para os sistemas Dish/Stirling com rastreamento solar, os cálculos dos ângulos são de muita importância, já que têm a capacidade de maximizar a energia concentrada na cavidade do receptor e maximizar as eficiências térmicas no sistema. O ângulo que está diretamente ligado com a eficiência é o ângulo de incidência. Para realizar este cálculo é necessário ter os seguintes parâmetros: ângulo horário, ângulo zenith, declinação solar, azimute solar, ângulo da superfície em relação ao plano horizontal e a direção para a qual está apontada a superfície.

3.1.1 Ângulo de declinação

O movimento de rotação da terra não ocorre num eixo vertical ao plano da órbita terrestre (Eixo eclíptico), que descreve o movimento de translação ao redor do sol, devido á inclinação que varia entre $\pm 23^{\circ} 27' 30''$, como é mostrado na figura 3.1, tendo importância na distribuição desigual da luz e calor solar em cada região. O ângulo de declinação não permanece fixo e esta é a causa das mudanças das estações ao longo do ano (Newton, 2007).

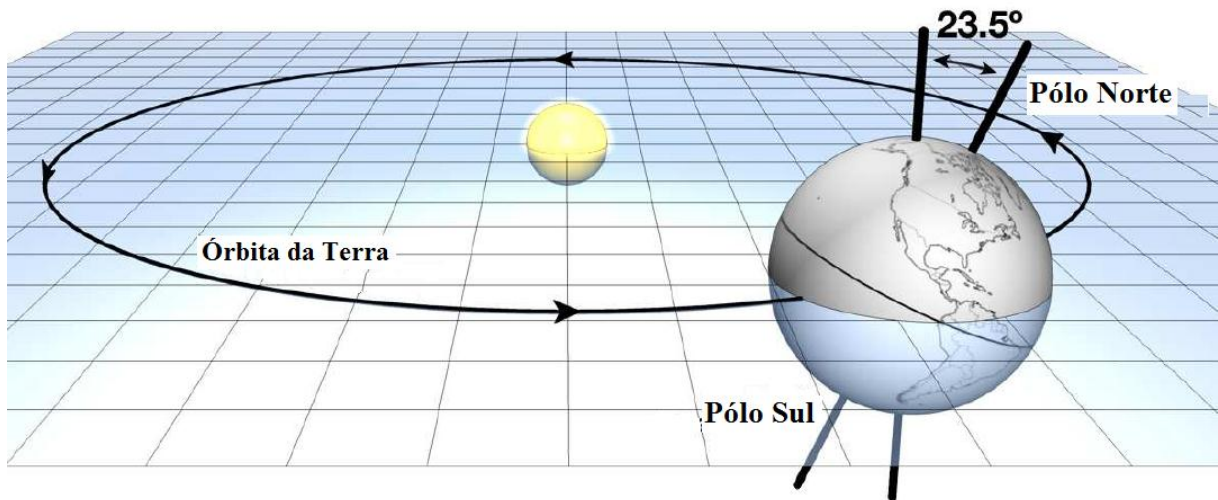


Figura 3.1 Inclinação da órbita terrestre com órbita equatorial (Valcher, 2010)

O ângulo entre o plano equatorial e a linha que liga os centros do Sol e da Terra muda todos os dias, de fato, a cada momento (Mella, 2005). Existem vários modelos para calcular a variação do ângulo de declinação que são definidos a seguir (Plasencia S et al., 2007):

➤ Método de Spencer (1971)

$$\delta = 0,006918 - 0,399912\cos(\beta) + 0,070257\sin(\beta) - 0,006758\cos(2\beta) + 0,000907\sin(2\beta) - 0,002697\cos(3\beta) + 0,00148\sin(3\beta) \quad (3-1)$$

Onde:

$$\beta = n * \left(\frac{2\pi}{365}\right) \quad (3-2)$$

n = Dia do ano (valores inteiros entre 1 e 365)

➤ Método de Perrin de Brichanbaut (1975)

$$\delta = \text{Arcsin}\left(0,4 * \sin\left(2 * \pi \frac{(n-82)}{365}\right)\right) \quad (3-3)$$

➤ Método de Cooper (1969)

$$\delta = 23,45^\circ \left(\frac{\pi}{180}\right) * \sin\left(2 * \pi \frac{(284+n)}{365}\right) \quad (3-4)$$

➤ Método de García (1994)

$$\delta = -23,45^\circ \left(\frac{\pi}{180}\right) * \cos\left(2 * \pi \frac{(n+9)}{365}\right) \quad (3-5)$$

Neste trabalho o modelo utilizado é será de Spencer por ser o mais difundido no mundo, como por exemplo, foi usado no atlas solar da Espanha e na Secretaria de Navegação e Oceanografia dos EUA (NOAA, por sua sigla em Inglês), e por apresentar maior precisão (Plasencia S et al., 2007). A figura 3.2, apresenta a variação do ângulo de declinação $\pm 23,45^\circ$ durante o ano para o Hemisfério Sul.

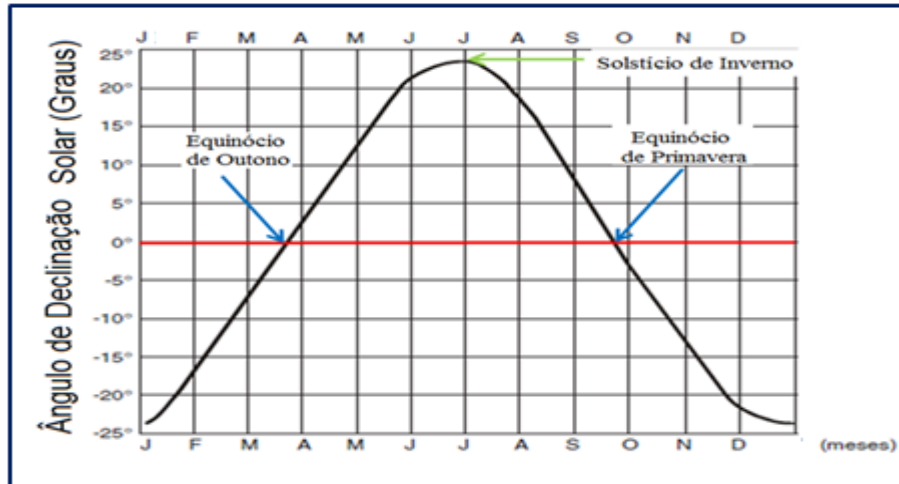


Figura 3.2 Ângulo de declinação em função da data (Newton, 2007)

3.1.2 Equação do Tempo

O tempo solar verdadeiro é baseado na rotação da Terra sobre seu eixo polar e o movimento ao redor do Sol. A diferença entre a hora solar verdadeira e o tempo solar médio é chamada equação do tempo, e varia durante todo o ano. Para determinar a equação do tempo, Spencer propõe a seguinte fórmula (em minutos):

$$E_t = (0,000075 + 0,001868 \cos \Gamma + 0,032077 \sin \Gamma - 0,014615 \cos 2\Gamma - 0,04089 \sin 2\Gamma) * (229,18) \quad (3-6)$$

$$\Gamma = \frac{360}{365} (n - 1) \quad (3-7)$$

n =Dia do ano (valores inteiros entre $1 \leq n \leq 365$).

O primeiro termo representa a equação do tempo em radianos, e 229,18 é o fator usado para converter radianos em minutos. O erro máximo da equação é da ordem de 0,0025 radianos, perto de 35 segundos (Mella, 2005). A figura 3.3, apresenta a equação do tempo ao longo do ano, onde se pode observar que atinge um valor máximo de 16 minutos e 24 segundos para o dia 308 do ano e um valor mínimo negativo de -14 minutos e 22 segundos o

dia 42 do ano, sendo os dias 105, 196, 245 e 359 nulos. Estas datas e os valores são apenas aproximados e variam ligeiramente cada ano.

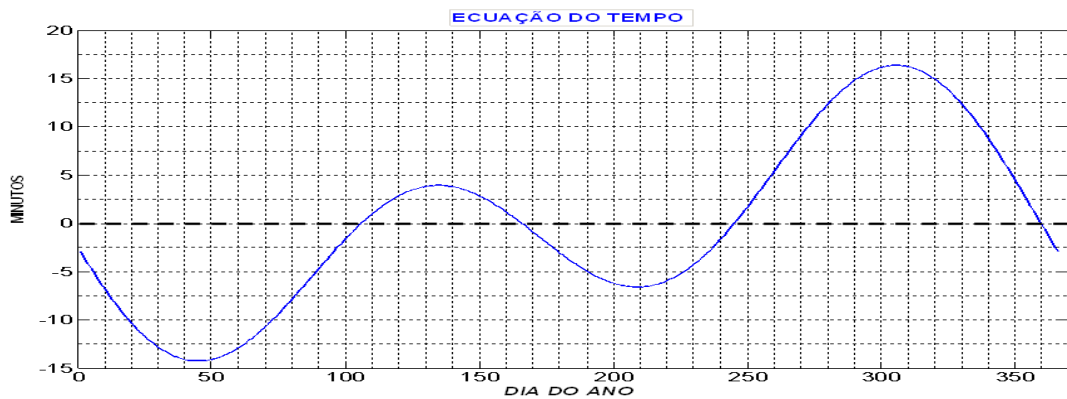


Figura 3.3 Equação do tempo (em minutos) em função da época do ano
(Duffie e Beckman, 1980)

A tabela 3.1 mostra a variação do ângulo de declinação e da equação do tempo com respeito ao meses do ano para alguns dias.

Tabela 3.1 Efeitos do ângulo de declinação com respeito ao meses do ano

Mês	Número de dias	Dia do mês	Dia do ano	E_t [min]	Declinação δ	Observação
Janeiro	d=31	15	15	-8.6335	-21.2695	
Fevereiro	31+d	14	45	-14.2663	-13.6198	+ 1 dia se o ano é
Março	59+d	16	75	-9.3553	-2.4177	
Abril	90+d	15	105	-0.2364	9.4149	
Maio	120+d	20	140	3.8002	19.9282	
Junho	151+d	19	170	-0.8862	23.4324	
Julho	181+d	19	200	-6.1988	20.8249	
Agosto	212+d	18	230	-4.2710	12.7859	
Setembro	243+d	17	260	5.3952	1.4120	
Outubro	273+d	17	290	14.8234	-10.3302	
Novembro	304+d	16	320	14.9633	-19.3780	
Dezembro	334+d	16	350	4.4794	-23.3717	

As quatro estações do ano são: primavera, verão, outono e inverno. Cada uma delas começa respectivamente, quando o Sol se encontra nos Equinócios e nos Solstícios. A palavra equinócio vem do Latim, *aequus* (igual) e *nox* (noite), e significam "noites iguais", ocasiões em que o dia e as noites duram o mesmo tempo, também apresentam mudanças das estações opostas para o Hemisfério Norte e Hemisfério Sul (Duffie e Beckman, 1980); como mostra a tabela 3.2.

Tabela 3.2 Datas das Estações do Ano para o Hemisfério Terrestre (Duffie e Beckman, 1980).

Hemisfério Sul	Dia do mês	Hemisfério Norte
Solstício de Verão	22 e 23 de dezembro	Solstício de Inverno
Equinócio de Outono	20 e 21 de março	Equinócio de Primavera
Solstício de Inverno	22 e 23 de junho	Solstício de Verão
Equinócio de Primavera	22 e 23 de setembro	Equinócio de Outono

Os solstícios são os momentos em que o Sol, durante seu movimento aparente na esfera celeste, atinge a maior declinação, medida a partir da linha do equador. Quando ocorre no verão significa que a duração do dia é a mais longa. Analogamente, quando ocorre no inverno, significa que a duração da noite é a mais longa.

3.1.3 Hora solar verdadeira

Alguns dados meteorológicos são frequentemente registrados com base na hora do relógio local. Na figura 3.4 mostra algumas condições a ter em conta para fazer a correção da hora solar verdadeira. Estas condições são definidas a seguir: (Duffie e Beckman, 1980):

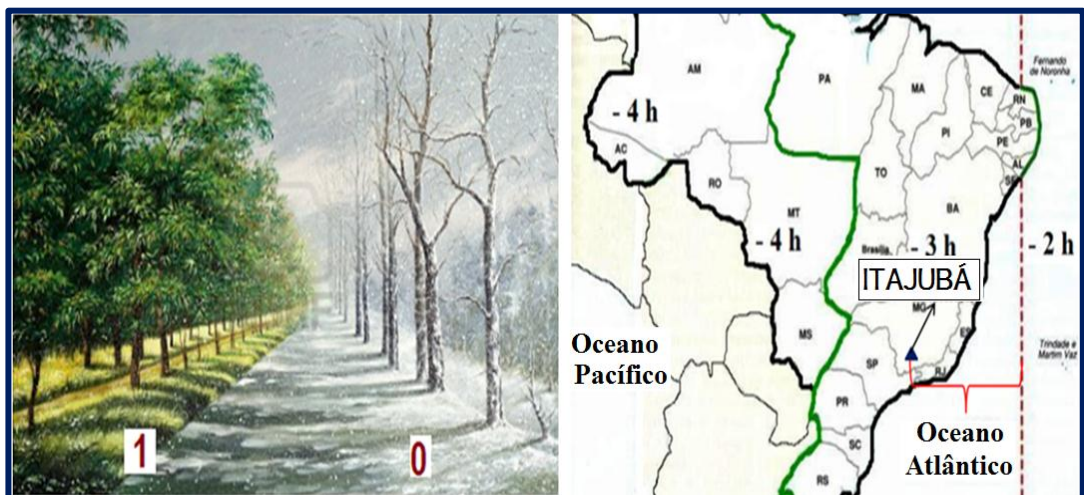


Figura 3.4 Fatores envolvidos para calcular a hora solar verdadeira

Disponível em: <http://www.muralesyvinilos.com>

Disponível em: <http://blog.livedoor.jp/arifesa/archives/5621069.html>

1. Há uma correção para a diferença de comprimento entre o meridiano local e o meridiano em que é baseado o horário local, para isso devemos saber que o sol leva 4 minutos para percorrer o 1° .

2. No Brasil é feita uma alteração no tempo de verão para um melhor aproveitamento da luz solar, e assim economizar energia.
3. Correção usando a equação de tempo para um dia do ano determinado.

A hora solar verdadeira, “**HSV**”, em um determinado local é, por definição, movimento angular aparente do Sol no céu (ângulo horário), expresso em horas (Montes P, 2008). Cada hora é igual a:

$$h_{solar} = 1h * \frac{360^\circ}{24h} = 15^\circ \quad (3-8)$$

Então:

$$HSV = \frac{\omega}{15^\circ} \quad (3-9)$$

A hora solar verdadeira tem uma duração desigual ao longo dos dias do ano, isto é devido ao movimento aparente do sol no horizonte e à composição de dois movimentos, um diário devido à rotação da Terra que pode ser perfeitamente uniforme e outro anual que não é uniforme devido à excentricidade da órbita terrestre. Assim, a hora solar verdadeira, que esta determinada pela observação do Sol, tem uma natureza mais geométrica e não é função linear do tempo, portanto, não serve para estabelecer uma escala de tempo uniforme (Ruiz e Silva, 2006).

O tempo oficial $h_l[h_r]$ é o tempo que toma o relógio digital; depende da regulamentação legal de cada país. Sendo $X[h_r]$ o avanço oficial do fuso horário, que pode variar ao longo do ano.

$$HSV = h_l[h_r] - X[h_r] + E[min] + 4(m_{con} - m_{loc})[min] \quad (3-10)$$

$X = 1$ Em verão e somente se houver mudança de horário

$X = 0$ No inverno ou se não houver mudança de horário de verão

3.1.4 Relação trigonométrica entre a posição do Sol e a Terra

As relações geométricas entre um plano de orientação arbitrária e a radiação incidente direta (ou seja, a posição relativa entre o sol e o plano) podem ser descritas em termos de ângulos conforme mostra a Figura 3.5 (Duffie e Beckman, 1980):

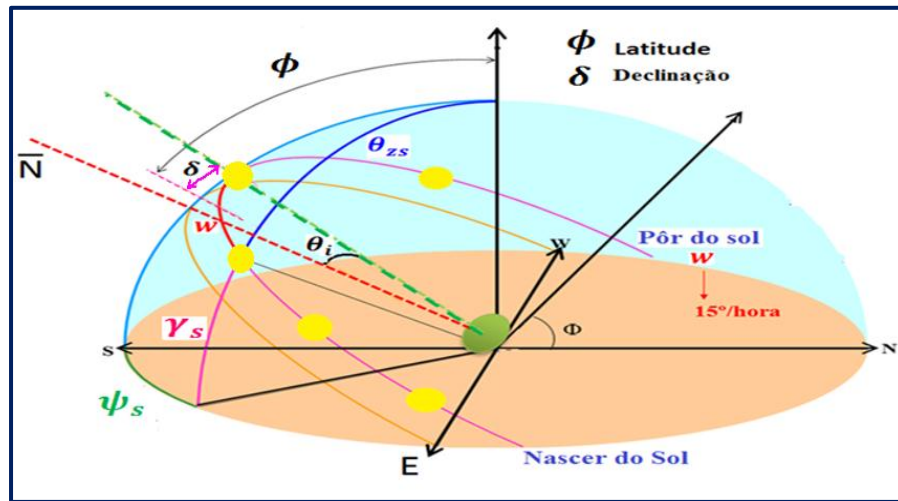


Figura 3.5 Esquema da posição do sol em relação a uma superfície horizontal
(Duffie e Beckman, 1980)

- ✓ Latitude (ϕ): Posição angular em relação ao Equador $-90^0 \leq \phi \leq 90^0$.
- ✓ Inclinação (β): Ângulo entre a superfície de interesse e o plano horizontal.
- ✓ Ângulo de tempo solar (ω): Corresponde ao deslocamento angular do Sol em direção ao leste ou oeste do meridiano local, devido à rotação da Terra sobre seu eixo. Este ângulo é medido oeste (+), leste (-), para o meio-dia tem um valor de 0^0 e à meia-noite tem um valor de 180^0 ; desta forma o ângulo de tempo muda 15^0 para cada hora que passa e seu valor é inferior à zero no período da manhã e maior que zero no período da tarde. O ângulo do tempo é calculado assim:

$$\omega = h_{solar_verd} * \frac{360}{24} + m_{solar_verd} * \frac{15}{60} + S_{solar_verd} * \frac{1}{240} \quad (3-11)$$

- ✓ Ângulo Zenith (θ_{zs}): Corresponde ao ângulo formado entre a linha Zenith do observador e a linha que une o observador ao Sol. Este é um ângulo entre $0^0 \leq \theta_{zs} \leq 90^0$. Para uma superfície com inclinação $\beta = 0^0$ o ângulo Zenith é representado pela seguinte equação:

$$\cos(\theta_{zs}) = \cos(\delta) * \cos(\phi) * \cos(\omega) + \sin(\delta) * \sin(\phi) \quad (3-12)$$

- ✓ Ângulo Solar (γ_s): Corresponde à altura angular do sol sobre o horizonte celeste do observador. $0^0 \leq \gamma_s \leq 90^0$.

$$\sin(\gamma_s) = \sin(\delta) * \sin(\phi) + \cos(\omega) * \cos(\delta) * \cos(\phi) \quad (3-13)$$

- ✓ **Ângulo Azimute do sol (ψ_s):** É o ângulo entre a projeção no plano horizontal do raio solar. Este ângulo é zero quando a projeção aponta para o norte, um valor positivo ao apontar para o oeste e negativo quando ele aponta para o leste. $-180^0 \leq \psi_s \leq 180^0$. O ângulo azimute pode ser representado pela seguinte equação:

$$\cos(\psi_s) = \frac{\sin(\theta_{zs}) * \sin(\phi) - \sin(\delta)}{\cos(\theta_{zs}) * \cos(\phi)} \quad (3-14)$$

- ✓ **Ângulo de azimute na superfície (α):** É o ângulo entre a projeção horizontal do vector normal à superfície, respeito ao meridiano local, com valor de zero ao sul, ao leste negativo e ao oeste positivo (CIEMAT, 2008).
- ✓ **Ângulo de incidência (θ_i):** Para a superfície arbitrariamente orientada corresponde ao ângulo formado entre a normal da superfície inclinada e a linha que une o observador ao Sol. Este é um ângulo entre $0^0 \leq \theta_i \leq 90^0$, a equação que relaciona o ângulo de incidência do feixe de radiação direta θ_i é:

$$\begin{aligned} \cos(\theta_i) = & \sin(\delta) * \sin(\phi) * \cos(\beta) - \sin(\delta) * \cos(\phi) * \sin(\beta) * \cos(\alpha) + \cos(\delta) * \\ & \cos(\phi) * \cos(\beta) * \cos(\omega) + \cos(\delta) * \sin(\phi) * \sin(\beta) * \cos(\alpha) * \cos(\omega) + \cos(\delta) * \\ & \sin(\beta) * \sin(\alpha) * \sin(\omega) \end{aligned} \quad (3-15)$$

Como δ e ϕ são constantes numa data e lugar determinado, a equação Ângulo Zenith pode ser expressa da seguinte maneira (Duffie e Beckman, 1980):

$$\cos(\theta_{zs}) = A + B \cos(\omega) \quad (3-16)$$

Esta equação tem muitas aplicações. Pode ser usada para calcular a radiação em função do tempo durante um dia em um plano horizontal, e também pode ser utilizada para calcular o tempo do nascimento e de pôr do sol, pela seguinte consideração:

Quando o sol nasce e se põe o ângulo zenital é 90^0 , não importa se é verão ou inverno. Nestas condições (Duffie e Beckman, 1980):

$$\cos(\theta_{zs}) = 0 \quad (3-17)$$

Portanto:

$$A + B \cos(\omega) = 0 \quad (3-18)$$

A equação que é necessária para determinar a posição do sol para esse instante, é determinada pela expressão (Duffie e Beckman, 1980):

$$w_s = \cos^{-1} \left(-\frac{A}{B} \right) = \cos^{-1} \left(-\frac{\sin(\delta) * \sin(\phi)}{\cos(\delta) * \cos(\phi)} \right) \quad (3-19)$$

Então para calcular o tempo do nascimento do sol utiliza-se a seguinte equação (Duffie e Beckman, 1980):

$$T_{\text{nasc}} = 12 - \frac{w_s}{15} + H_{\text{adelan}} \quad (3-20)$$

Para calcular o tempo do poente:

$$T_{\text{poente}} = 12 + \frac{w_s}{15} + H_{\text{adelan}} \quad (3-21)$$

Para calcular a insolação solar de luz:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi * \tan \delta) \quad (3-22)$$

3.2 IRRADIAÇÃO SOLAR NA CIDADE DE ITAJUBÁ

O município de Itajubá situa-se no sul do Estado de Minas Gerais, numa altitude de 1746 metros no seu ponto mais alto e de 830 metros no ponto mais baixo, acima do nível do mar, sendo que a área urbana, sem considerar os morros, fica numa altitude média de 842 metros, ocupando uma área de 290,45 Km² de extensão. A localização geográfica da cidade de Itajubá- M.G Brasil é apresentada na tabela 3.3:

Tabela 3.3 Localização geográfica da cidade de Itajubá (Ministério da ciência, 2010).

Latitude	22° 24' 46,951" S
Longitude	-45° 27' 6,101" W
Altura	845 m.a.n.m*

* Metros acima do nível do mar

A topografia de Itajubá é do tipo ondulada-montanhosa. O território apresenta-se plano (10%), ondulado (12%) e montanhoso em sua maior parte (78%) (Itajubá, 2011)

Situado nos limites meridionais do clima temperado, sob influência da elevada altitude da região, o clima de Itajubá é do tipo temperado, com oscilações bruscas de temperatura e predominância de ventos (NE). A precipitação pluviométrica média é 1 409,5 milímetros ao ano, chegando ao maior nível nos meses de dezembro e janeiro. A temperatura média anual é

de 14 graus centígrados, com máxima média anual de 21,3 graus centígrados e mínima média anual de 8,1 graus centígrados. Há registros que indicam queda de neve na cidade no século XX. São comuns geadas nos meses mais frios (Itajubá, 2011).

3.3 VARIAÇÃO DA IRRADIAÇÃO SOLAR EM ITAJUBÁ

A irradiação solar varia ao variar a massa de ar, que muda constantemente desde o amanhecer ao anoitecer (Plasencia S et al., 2007). Nas figuras 3.6 e 3.7 se apresentam a variação da irradiação solar para a cidade de Itajubá, observando-se que para diferentes épocas do ano o comportamento reflete diferentes intensidades, isto é devido a fatores climatológicos como velocidade do vento, cobertura de nuvens, sombra, pluviosidade, etc. Os dados apresentados foram fornecidos pela Estação Meteorológica da Universidade Federal de Itajubá "UNIFEI".

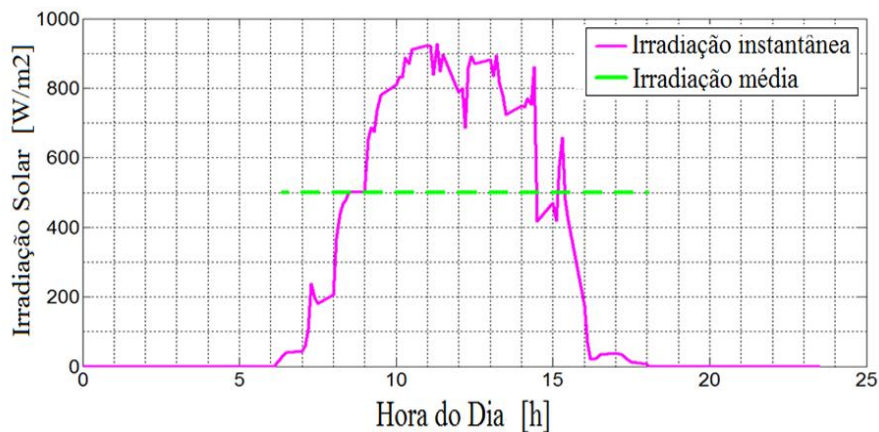


Figura 3.6 Variação da irradiação solar na cidade de Itajubá (01/04/2010)

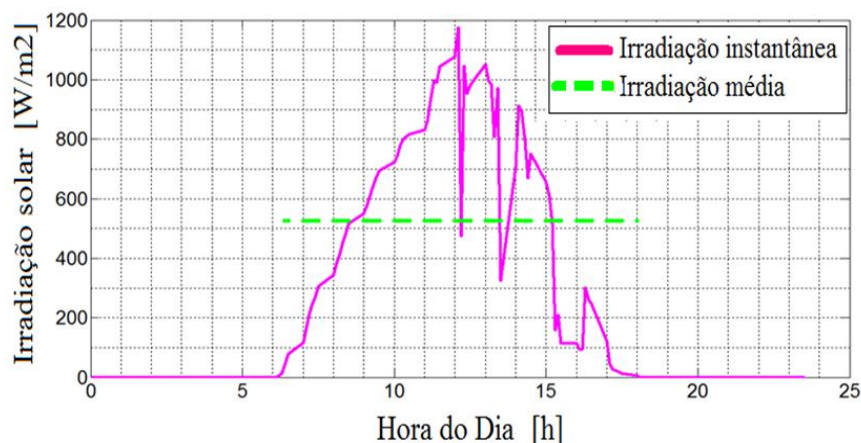


Figura 3.7 Variação da irradiação solar na cidade de Itajubá (15/04/2010)

Capítulo 4.

METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO

4.1 ESTUDO TEÓRICO DO CONCENTRADOR PARABÓLICO

A irradiação solar refletida por um concentrador depende da sua geometria. Para altas concentrações o parabolóide de revolução é a melhor opção, permitindo a concentração dos raios solares no foco, que são paralelas ao eixo da abertura (Barbieri e Sodré, 2005).

A parábola é o lugar geométrico dos pontos num plano equidistante de um ponto fixo chamado foco e de uma linha fixa chamada diretriz, como se mostra na figura 4.1. Para determinar a abertura da parábola utiliza-se a seguinte fórmula:

$$Z = aY^2 + bY + c \quad (4-1)$$

Assumindo que:

$$b = c = 0$$

Já que são os coeficientes de posicionamento, então:

$$Z = aY^2 \quad (4-2)$$

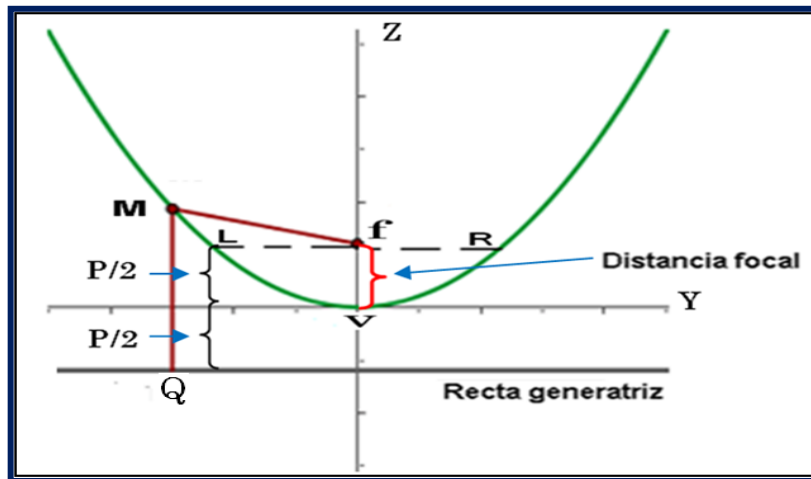


Figura 4.1 Geometria de uma parábola (Gual, 2009)

Seja \mathbf{M} um ponto qualquer sobre a parábola, atende com $\overline{Mf} = \overline{MQ}$ e \overline{MQ} , deve ser perpendicular à reta geratriz (Gual, 2009).

A distância entre os pontos \mathbf{M} e \mathbf{Q} é dada pela equação:

$$\overline{MQ} = M(\mathbf{0}, \mathbf{Z}) + P/2 \quad (4-3)$$

$M(\mathbf{0}, \mathbf{Z}) = Z$, indica o valor do ponto \mathbf{M} no eixo \mathbf{Z} .

A distância entre os pontos \mathbf{f} e \mathbf{M} é dada pela equação:

$$\overline{Mf} = \sqrt{M(\mathbf{Y}, \mathbf{0})^2 + (M(\mathbf{0}, \mathbf{Z}) - P/2)^2} \quad (4-4)$$

$M(\mathbf{Y}, \mathbf{0}) = Y$, indica o valor do ponto \mathbf{M} no eixo \mathbf{Y} .

Por definição $\overline{MQ} = \overline{Mf}$, mesmo assim:

$$\sqrt{Y^2 + (Z - P/2)^2} = Z + P/2 \quad (4-5)$$

Resolvendo \mathbf{Y} é obtido:

$$Y^2 = 2PZ \quad (4-6)$$

Esta é a equação que se refere ao eixo de simetria. $2P$ é o dobro da distância entre a diretriz e o foco então:

$$P = 2f \quad (4-7)$$

Então:

$$Y^2 = 4fZ \quad (4-8)$$

Resolvendo:

$$Z = \frac{Y^2}{4f} \quad (4-9)$$

Então demonstrou que a é igual:

$$a = 1/4f \quad (4-10)$$

Então, o foco é igual a:

$$f = 1/4a \quad (4-11)$$

4.2 GEOMETRIA DO PRATO PARABÓLICO

A equação que descreve um parabolóide de revolução em um sistema é:

$$X^2 + Y^2 = 4fZ \quad (4-12)$$

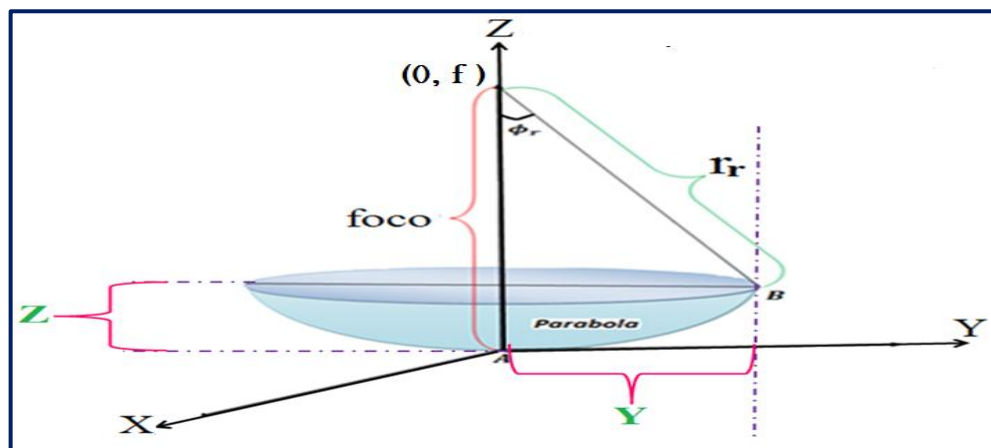


Figura 4.2 Parabolóide de revolução

Onde:

$\phi_r =$ Ângulo de borda [rad]

$r_r =$ Distância de borda [m]

Da figura 4.2, pode-se deduzir o seguinte:

$$\tan \phi_r = \frac{Y}{f-Z} \quad (4-13)$$

Também pode-se deduzir que:

$$\sin \phi_r = \frac{Y}{r_r} \quad (4-14)$$

Agora colocando tudo em termos de Z:

$$f - Z = \frac{Y}{\tan \phi_r} \quad (4-15)$$

$$Z = f - \frac{Y}{\tan \phi_r} \quad (4-16)$$

Substituindo em:

$$Y^2 = 4fZ \quad (4-17)$$

$$Y^2 = 4f \left(f - \frac{Y}{\tan \phi_r} \right) \quad (4-18)$$

Então:

$$Y^2 = 4f^2 - \frac{4fy}{\tan \phi_r} \quad (4-19)$$

Agora substituindo a equação:

$$Y = r_r \sin \phi_r \quad (4-20)$$

Na equação (4-19):

$$(r_r \sin \phi_r)^2 = 4f^2 - \frac{4f * r_r \sin \phi_r}{\tan \phi_r} \quad (4-21)$$

E substituindo a identidade trigonométrica:

$$\cos \phi_r^2 + \sin \phi_r^2 = 1 \quad e \quad \tan \phi_r = \frac{\sin \phi_r}{\cos \phi_r} \quad (4-22)$$

Simplificando, obtém-se:

$$r_r = \frac{2f}{1 + \cos \phi_r} \quad (4-23)$$

Esta equação (4-23) determina o valor do raio de borda ou a distância que existe desde o foco para qualquer ponto dentro da superfície do coletor (Rabl, 1978).

Substituindo na equação (4-14), $Y = D_p/2$ que corresponde à metade da abertura, obtém-se:

$$r_r = \frac{D_p/2}{\sin \phi_r} \quad (4-24)$$

Igualando obtém-se:

$$\frac{2f}{1 + \cos \phi_r} = \frac{D_p/2}{\sin \phi_r} \quad (4-25)$$

Simplificando, obtém-se:

$$\tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right) = \frac{D_p/2}{4f} \quad (4-26)$$

A relação entre o diâmetro da abertura, ângulo borda e distância focal é:

$$f = \frac{D_p}{4 \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right)} \quad (4-27)$$

Por outro lado, é possível determinar uma relação para o ângulo de borda em função do diâmetro da abertura e foco (Gual, 2009).

Voltando à equação:

$$Y^2 = 4f^2 - \frac{4fy}{\tan \phi_r} \quad (4-28)$$

Multiplicando por $1/Y^2$ em ambos os lados é:

$$1 = \frac{4f^2}{Y^2} - \frac{4f}{Y \tan \phi_r} \quad (4-29)$$

Então:

$$\tan \phi_r = \frac{\frac{4f}{Y}}{\frac{4f^2}{Y^2} - 1} \quad (4-30)$$

Se substituirmos $Y = D_p/2$ obtém-se:

$$\phi_r = \tan^{-1}\left(\frac{8f/D_p}{(16(f/D_p)^2 - 1)}\right) \quad (4-31)$$

Tendo estabelecido os parâmetros geométricos envolvidos no parabolóide de revolução, se estabelece na seguinte secção as distâncias equivalentes para que o nível de concentração seja o máximo e as perdas diminuam.

4.3 CÁLCULO DE DISTÂNCIAS EQUIVALENTES

O Cálculo das distâncias equivalentes da geometria do Coletor/Receptor (figura 4,3) está determinado a fim de maximizar a energia solar na cavidade do receptor, pois um projeto bem elaborado da geométrica otimiza os parâmetros como: interceptação geométrica, concentração geométrica, fator de configuração geométrica, etc. Cada coletor tem formas e dimensões diferentes de acordo com as necessidades exigidas.

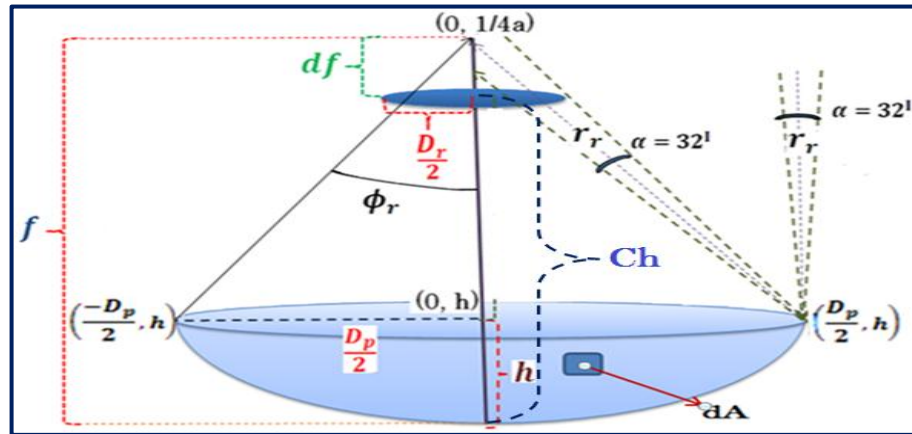


Figura 4.3 Distâncias equivalentes no parabolóide adaptado de (Jaramillo S, 1998)

Onde:

f = Distância focal [m]

C_h = Altura do projeto do receptor [m]

dA = Diferencial de área [m²]

df = Distância de projeto do receptor [m]

h = Altura da parábola [m]

a = Curvatura da parábola [1/m]

D_p = Diâmetro do coletor [m]

D_r = Diâmetro do receptor [m]

$\alpha =$ Ângulo do sol [rad]

Já determinados geometricamente os parâmetros do Coletor/Receptor, se projeta a nova localização do receptor C_h . O deslocamento do receptor do ponto focal é feito a fim de prevenir a fadiga do material sobre a superfície do receptor, causada porque a radiação solar refletida é concentrada num único ponto. Para determinar a distância d_f , que garante uma distribuição uniforme da radiação solar sobre a superfície do receptor, mostrado na figura 4.3, aplica-se a relação de triângulos semelhantes (Gual, 2009).

$$\frac{D_p/2}{D_r/2} = \frac{f-h}{d_f} \quad (4-32)$$

Isolando d_f obtém-se:

$$d_f = \left(\frac{1}{4a} - h\right) \frac{D_r}{D_p} \quad (4-33)$$

d_f é a altura do triângulo formado entre o receptor e o último ponto da parábola “foco”.

Substituindo o ponto $\left(D_p/2, h\right)$, em $Z = aY^2$ então:

$$h = a \left(D_p/2\right)^2 \quad (4-34)$$

Substituindo a curvatura da parábola, $a = 1/4f$ a equação fica:

$$h = \frac{1}{4f} * \frac{D_p^2}{4} \quad (4-35)$$

A distância de projeto onde deve ficar o receptor em função do foco, função da razão dos diâmetros de coletor e o receptor são apresentados como (Gual, 2009):

$$d_f = \left(f - \frac{1}{4f} * \frac{D_p^2}{4}\right) \frac{D_r}{D_p} \quad (4-36)$$

A altura de projeto do foco para aproveitar a irradiação solar em toda a superfície do receptor em função da distância focal é:

$$C_h = f - d_f \quad (4-37)$$

Em função do seu diâmetro torna-se:

$$C_h = f - \left(f - \frac{1}{4f} * \frac{D_p^2}{4} \right) \frac{D_r}{D_p} \quad (4-38)$$

Já calculada a distância que deve ter o coletor ao receptor C_h , estabelecemos qual é a variação percentual dos raios do sol que impacta ao receptor se o coletor estiver inclinado à determinado ângulo γ em relação ao sol (Gual, 2009). A figura 4.4 mostra o desvio da irradiação solar que atinge a superfície do receptor, onde L é definido como a distância provocada pela variação do ângulo de inclinação do coletor em relação ao sol.

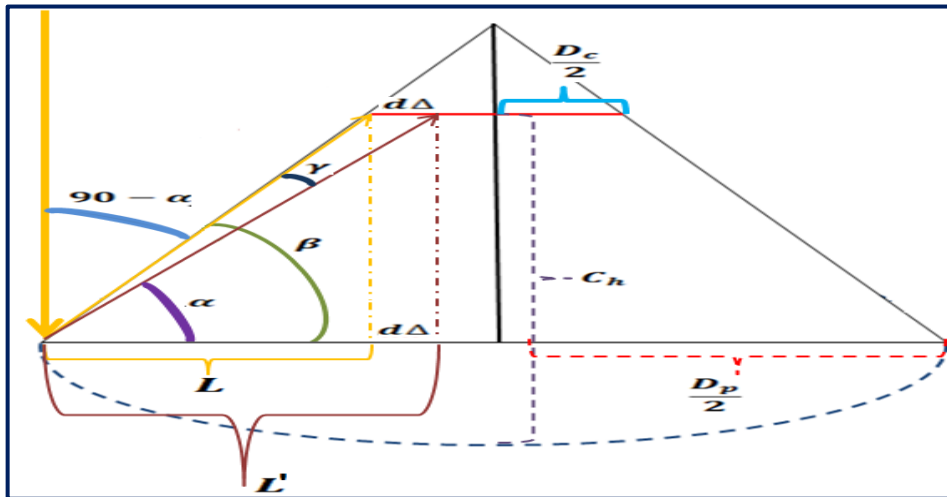


Figura 4.4 Variação do ângulo de desvio da irradiação solar

Onde:

β = Ângulo que descreve a direção do feixe do sol refletido do espelho coletor e que atinge a superfície do receptor.

α = Ângulo que descreve a direção do feixe do sol, quando o coletor estiver inclinado à determinado ângulo em relação ao sol.

γ = Ângulo de inclinação do coletor respeito ao sol

L = Distância de desvio do sol

Os ângulos envolvidos nos cálculos de desvio do feixe da irradiação solar podem ser representados da seguinte forma:

$$\tan \beta = \frac{C_h}{\frac{D_p}{2} - \frac{D_r}{2}} \quad \text{entonces} \quad \beta = \tan^{-1} \left(\frac{C_h}{\frac{D_p}{2} - \frac{D_r}{2}} \right)$$

Colocando β em função do foco e diâmetro do coletor e receptor fica da seguinte maneira:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{f - \left(f - \frac{1}{4f} * \frac{D_p^2}{4} \right) \frac{D_r}{D_p}}{\frac{D_p - D_r}{2} - \frac{D_r}{2}} \right) \quad (4-39)$$

Observe na figura 4.4 que α é definida como a diferença entre:

$$\alpha = \beta - \gamma \quad (4-40)$$

Substituindo em β :

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{f - \left(f - \frac{1}{4f} * \frac{D_p^2}{4} \right) \frac{D_r}{D_p}}{\frac{D_p - D_r}{2} - \frac{D_r}{2}} \right) - \gamma \quad (4-41)$$

Agora definem a distância de desvio do sol L

$$\tan(90 - \alpha) = \frac{L}{C_h} \quad (4-42)$$

Isolando L obtém-se:

$$L = C_h * \tan(90 - \alpha) \quad (4-43)$$

Substituindo o ângulo α :

$$L = C_h * \tan \left(90 - \tan^{-1} \left(\frac{f - \left(f - \frac{1}{4f} * \frac{D_p^2}{4} \right) \frac{D_r}{D_p}}{\frac{D_p - D_r}{2} - \frac{D_r}{2}} \right) - \gamma \right) \quad (4-44)$$

E substituindo em C_h :

$$L = \left(f - \left(f - \frac{1}{4f} * \frac{D_p^2}{4} \right) \frac{D_r}{D_p} \right) * \tan \left(90 - \tan^{-1} \left(\frac{f - \left(f - \frac{1}{4f} * \frac{D_p^2}{4} \right) \frac{D_r}{D_p}}{\frac{D_p - D_r}{2} - \frac{D_r}{2}} \right) - \gamma \right) \quad (4-45)$$

Para encontrar a variação da distância de desvio da irradiação solar na superfície do receptor $d\Delta$ é:

$$d\Delta = L - \left(\frac{D_p}{2} - \frac{D_r}{2} \right) \quad (4-46)$$

$d\Delta$ = Variação da distância da radiação solar no receptor

4.4 COMPRIMENTO DE UMA PARÁBOLA

O cálculo do comprimento do arco de uma parábola pode ser realizado por meio da integração de uma área diferencial da curva (Ilhem, 2009).

Ao considerar a função da parábola e sua derivada contínua no intervalo $[-\frac{D_p}{2}, \frac{D_p}{2}]$, o comprimento do arco da curva da parábola $Y^2 = 4 * f * Z$ é descrito pelo seguinte teorema:

$$S = \int_{-\frac{D_c}{2}}^{\frac{D_c}{2}} \sqrt{1 + [f'(Z)]^2} dz \quad (4-47)$$

$S =$ Comprimento da parábola

Isolando Y e derivando, obtém-se:

$$Y' = \frac{\sqrt{4*f}}{2\sqrt{Z}} \quad (4-48)$$

Aplicando a equação (4-47) é obtido:

$$S = \int_{-\frac{D_p}{2}}^{\frac{D_p}{2}} \sqrt{1 + \left[\frac{\sqrt{4*f}}{2\sqrt{Z}}\right]^2} dz \Rightarrow S = \int_{-\frac{D_p}{2}}^{\frac{D_p}{2}} \sqrt{1 + \frac{f}{Z}} dz \quad (4-49)$$

Resolvendo a integral por meio de substituições trigonométricas, como mostra a figura 4.5, deduz-se que:

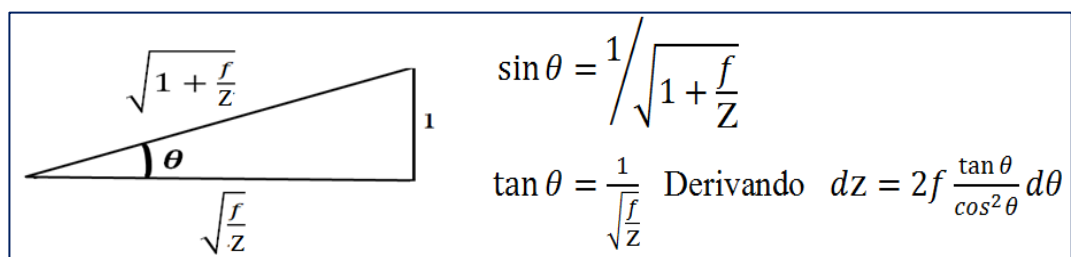


Figura 4.5 Relações trigonométricas

$$S = \int 2f \frac{\tan \theta}{\sin \theta} * \frac{1}{\cos^2 \theta} d\theta \quad (4-50)$$

Simplificando:

$$S = \int \sec^3 \theta d\theta \quad (4-51)$$

Aplicando a integração por partes:

$$U = 2f \sec \theta \quad dv = \sec^2 \theta d\theta$$

$$dU = 2f \frac{\sec \theta}{\cos^2 \theta} d\theta \quad v = \tan \theta$$

$$S = 2 * f * \sec \theta * \tan \theta - \int 2f * \tan^2 \theta * \sec \theta d\theta \quad (4-52)$$

Resolvendo a integração, obtém-se:

$$S = 2 * f * \sec \theta * \tan \theta + 2 * f * \ln |\sec \theta + \tan \theta| \quad (4-53)$$

Substituindo da Figura 4.5:

$$S = 2 * f * \sqrt{\frac{z}{f} + 1} * \sqrt{\frac{z}{f}} + 2 * f * \ln \left| \sqrt{\frac{z}{f} + 1} + \sqrt{\frac{z}{f}} \right| \quad (4-54)$$

Substituindo $Z=D_p/2$ e $f = \frac{D_p^2}{16h}$:

$$S = \left[\frac{D_p}{2} \sqrt{\left(\left(\frac{4h}{D_p} \right)^2 + 1 \right)} \right] + 2 * f * \ln \left[\frac{4h}{D_p} + \sqrt{\left(\left(\frac{4h}{D_p} \right)^2 + 1 \right)} \right] \quad (4-55)$$

4.5 RECEPTOR PLANO

A Figura 4.7 mostra a radiação solar incidente, refletida pela superfície do coletor. A geometria do parabóide de revolução permite concentrar a radiação incidente sobre um plano receptor. Para o diâmetro da abertura D_p , obtém-se a seguinte relação (Jaramillo S, 1998):

$$D_p = 2r_r \sin \phi_r \quad (4-56)$$

E para a área de abertura:

$$A_{abertura} = \frac{\pi}{4} D_p^2 \quad (4-57)$$

Admitindo que:

$$32' * \frac{1/60^0}{1'} * \frac{\pi}{180^0} = 0,00931 \text{ [rad]} \quad (4-58)$$

$$\alpha = 32' \rightarrow 0,00931 \text{ [rad]} \quad (4-59)$$

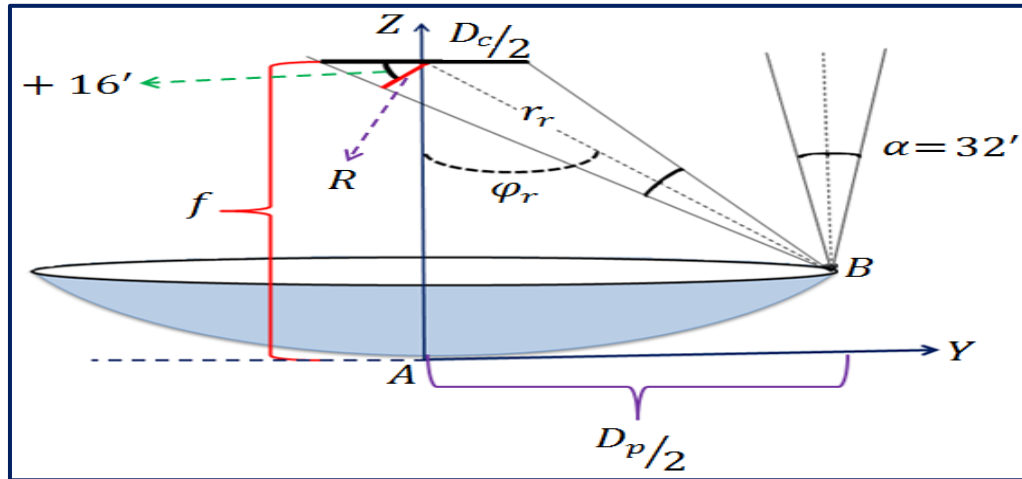


Figura 4.6 Seção transversal de refletor parabólico e o comportamento de um feixe de radiação adaptado de (Ramires, 1989)

Convertendo os 32' do ângulo solar em graus:

$$32' * \frac{1/60^0}{1'} = 0,533333 \text{ [rad]} \quad (4-60)$$

A partir da figura 4.6, pode-se deduzir:

$$\frac{D_r}{2} = \frac{R}{\cos(\phi_r + 0,267^0)} \quad (4-61)$$

Onde **R**:

$$R = r_r \sin(0,267^0) \quad (4-62)$$

Substituindo R na equação

$$\frac{D_r}{2} = \frac{r_r \sin(0,267^0)}{\cos(\phi_r + 0,267^0)} \quad (4-63)$$

O diâmetro do receptor em função do diâmetro do coletor é:

$$D_r = \frac{D_p \sin(0,267^0)}{\sin \phi_r \cos(\phi_r + 0,267^0)} \quad (4-64)$$

Observa-se na equação (4-64) o diâmetro do receptor depende do ângulo da borda e do diâmetro do coletor.

4.6 RAZÃO DE CONCENTRAÇÃO GEOMÉTRICA

A razão de concentração máxima num concentrador é função da geometria do receptor. Cada tipo de receptor tem uma forma particular de interceptar a radiação solar, obtendo-se diferentes distribuições de energia por unidade de área. A radiação solar direta encontra-se suportada num cone angular $\alpha=32'$ ou $\alpha=0,53^\circ$ como se mostra na figura 4.7. Isto é devido à distância de $1,495 \times 10^{11}$ que há entre Terra-Sol (Gaven e Bannerot, 1984).

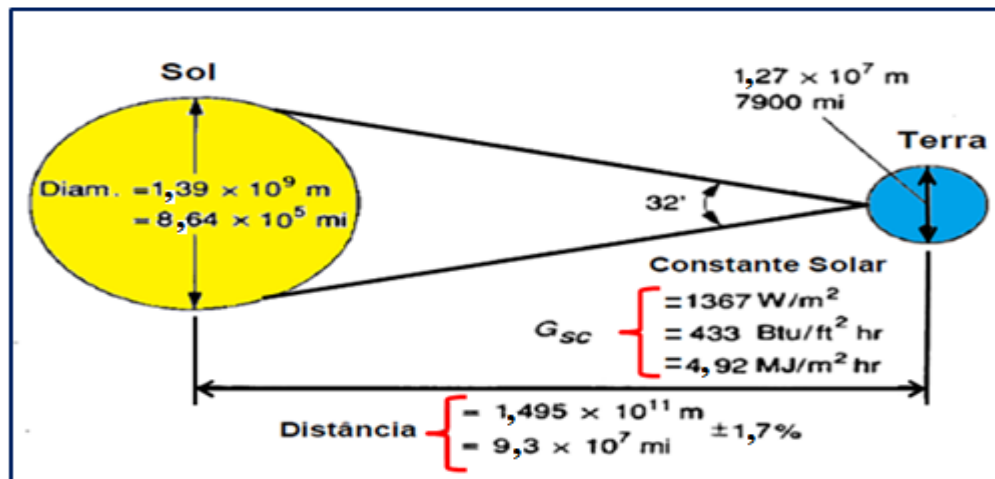


Figura 4.7 Relação do ângulo solar entre Sol-Terra (Ramires, 1989)

A razão de concentração esta definida como a razão entre a área de abertura $A_{abertura}$ e a área receptora $A_{receptor}$ definida na equação (4-57).

$$C_{geometrica} = \frac{A_{abertura}}{A_{receptor}} \quad (4-65)$$

Onde:

$A_{abertura}$ = Área de abertura do espelho coletor

$A_{receptor}$ = Abertura da cavidade do receptor

4.7 CONCENTRAÇÃO MÁXIMA

Com o diâmetro do receptor em função do ângulo de borda e o diâmetro do coletor, pode-se calcular a concentração máxima geométrica C_{max} .

$$C_{max} = \frac{A_{abertura}}{A_{receptor}} \quad (4-66)$$

$A_{abertura}$ = Area de abertura do concentrador

$A_{receptor}$ = Area de abertura do receptor

$$C_{max} = \frac{A_{abertura}}{A_{receptor}} = \frac{\frac{\pi D_p^2}{4}}{\frac{\pi D_r^2}{4}} = \frac{D_p^2}{D_r^2} \quad (4-67)$$

Então C_{max} em função do ângulo de borda é:

$$C_{max} = \left(\frac{\sin \phi_r \cos(\phi_r + 0,267^\circ)}{\sin(0,267^\circ)} \right)^2 \quad (4-68)$$

Nesta expressão não é considerada a dispersão angular no receptor. Esta dispersão angular é dada por três causas: rastreamento solar inadequado, rugosidade na superfície do coletor (má qualidade no polimento do espelho) e erro na curvatura do coletor (Gaven e Bannerot, 1984).

No entanto, os feixes de luz provenientes do sol não incidem exatamente paralelos entre-si, como consequência os raios refletidos não convergem para um só ponto, mas sim para uma região, como é mostrado na Figura 4.8. Na mesma figura observa-se dois feixes incidentes, um sobre o ponto (A) e outro sobre o vértice (O). O ângulo α representa o ângulo que os raios solares apresentam entre-si, usualmente, adota-se o valor de $\alpha = 32'$ e onde o ângulo θ esta formado entre a feixe na borda do coletor e o vertice (O) (Batista, 2007)

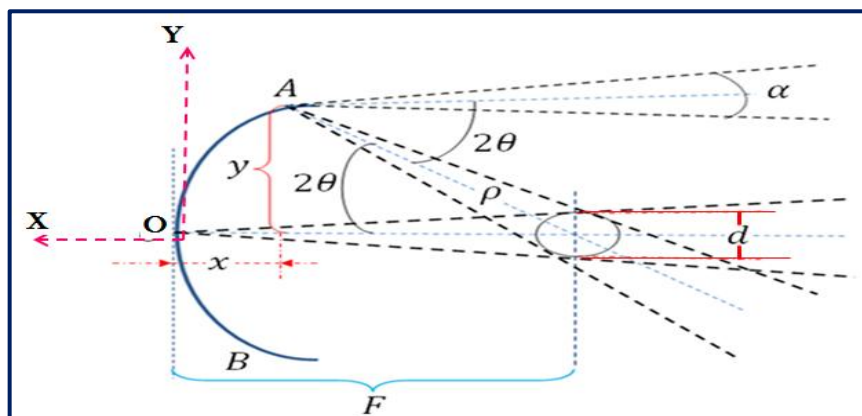


Figura 4.8 Esquema de concentrador com raios incidentes não paralelos (Batista, 2007)

Os raios que incidem sobre (O) retornam sobre-si, próprios formando uma imagem no plano focal de diâmetro $d = F \alpha$ e o feixe que incide sobre (A) forma uma imagem elíptica sobre o plano focal $\alpha \rho$. É necessário considerar o ângulo de dispersão, porque uma fração da energia concentrada está fora da área de absorção no receptor, causando baixos rendimentos e danos no mesmo (Batista, 2007). Na figura 4.9 mostra o efeito do erro de rastreamento e erro de superfície, afetando a concentração solar na cavidade do receptor (Howard e Harley, 2009).

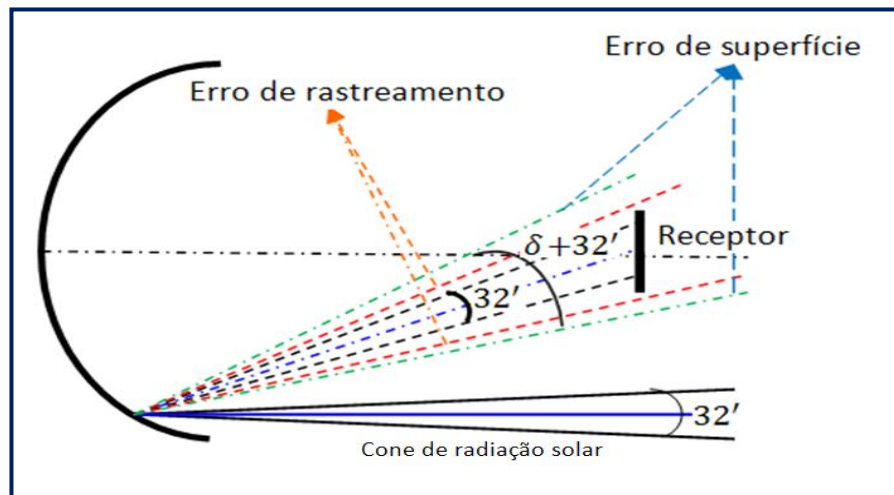


Figura 4.9 Fatores que afetam a concentração solar (Howard e Harley, 2009)

Considerando que a intersecção de toda a radiação especular refletida está num cone angular com $32' + \delta$, então, a concentração máxima tendo em conta o erro de dispersão, é definida como (Kandilli e Ulgen, 2007):

$$C_{max} = \left(\frac{\sin \phi_r \cos \left(\phi_r + 0,2670 + \frac{\delta_{disp}}{2} \right)}{\sin \left(0,2670 + \frac{\delta_{disp}}{2} \right)} \right)^2 \quad (4-69)$$

Onde:

δ_{disp} = Ângulo de dispersão [rad]

Na equação (4-69) observa-se que o ângulo de borda é o único parâmetro da geometria que está envolvido na concentração. O índice de concentração máxima é limitado por diversos fatores, tais como absorvidade e refletividade (propriedades dos materiais) (Howard e Harley, 2009).

$$C_{max,Real} = C_{max} * \alpha_{abs} * \rho \quad (4-70)$$

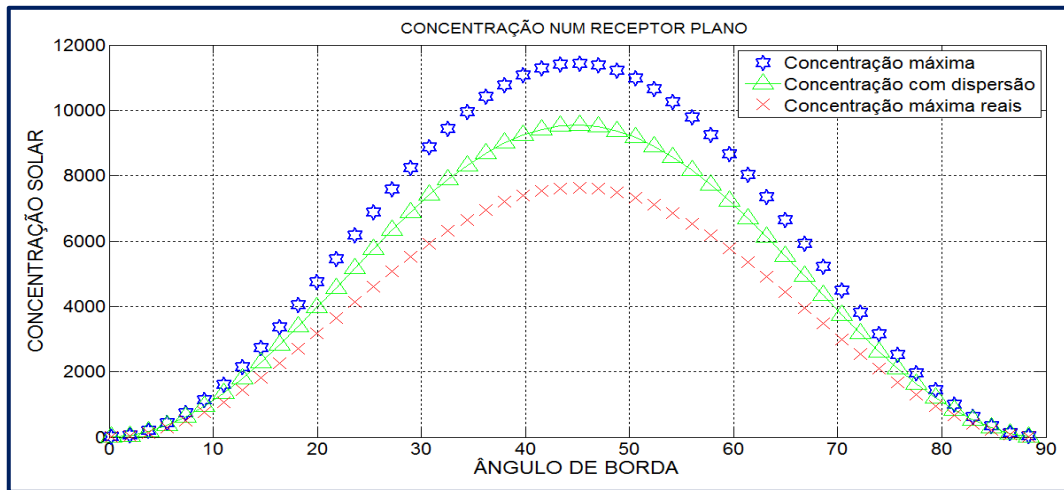


Figura 4.10 Variação da concentração solar (Howard e Harley, 2009)

A Figura 4.10, mostra a variação da concentração solar com respeito ao ângulo da borda, o máximo de eficiência é dado para um ângulo de borda de 45° . A concentração solar diminuiu devido às perdas de dispersão, perdas por degradação do espelho, etc (Kandilli e Ulgen, 2007).

- ✓ A primeira curva (☆☆) representa a concentração máxima geométrica, sem dispersão $\delta = 0$, para um receptor plano. Isso ocorre se a radiação é completamente especular na superfície do coletor e o sistema de rastreamento é absolutamente perfeito.
- ✓ A segunda curva (ΔΔ) representa a concentração máxima limitada pela rugosidade do espelho refletor.
- ✓ A terceira curva (++) representa a concentração máxima real limitada pelas propriedades do material.
- ✓ A concentração máxima ocorre para um ângulo de borda $\phi_r = 45^\circ$ e tem um valor máximo de concentração ideal de 12000 soles.

Outra maneira de calcular o comprimento focal ideal para alcançar uma maior concentração pode ser obtida combinando as equações:

$$f = \frac{D_p}{4 \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right)} \quad (4-71)$$

$$C_{max} = \frac{D_p^2}{D_r^2} \quad (4-72)$$

Fica :

$$f_0 = \frac{D_r}{4 \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right)} * C_{max}^{\frac{1}{2}} \quad (4-73)$$

A equação (4-73) garante um nível de concentração máxima.

4.8 ERROS ÓTICOS

O limite máximo para sistemas parabolóides de 3 dimensões é dado pela equação (4-74):

$$C_{max-3D} = \frac{1}{\sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = 46189 \quad (4-74)$$

No entanto quando se usam refletores e receptores reais, deve ser considerada uma série de fenômenos que fazem que o fator de concentração real seja significativamente menor (Gaven e Bannerot, 1984). Na figura 4.11 mostra alguns destes efeitos ópticos, que são classificados da seguinte maneira sobre a superfície do coletor:

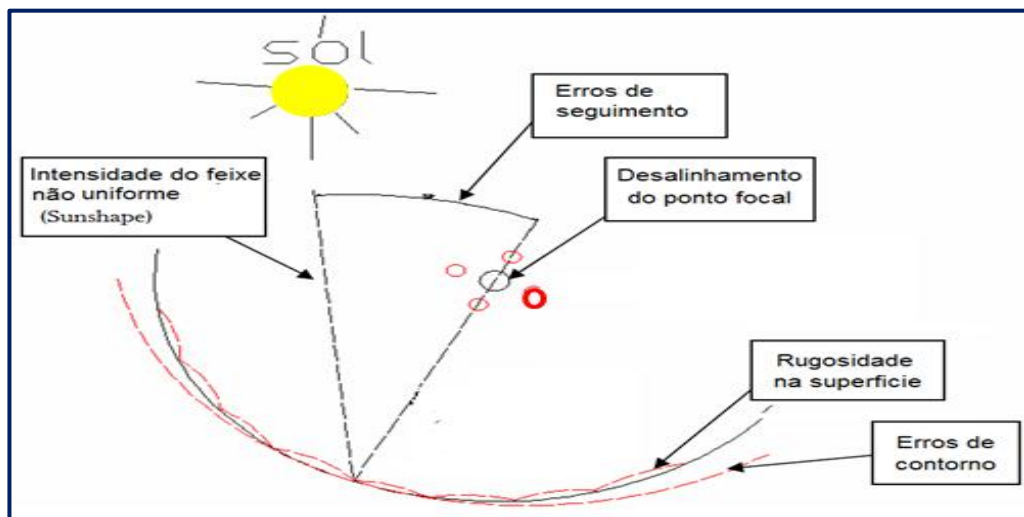


Figura 4.11 Esquema representativo das causas dos erros ópticos. (Gavilán, 2007)

4.8.1 Fator de interceptação ϕ

A relação de interceptação geométrica é sempre menor que a unidade e é a fração da irradiação refletida que é interceptada pela superfície do receptor. Este fator é muito importante no balanço de energia, já que depende da geometria do Coletor/Receptor, de sua orientação com relação ao movimento relativo do Sol, das imperfeições no material da superfície do espelho do coletor (erro óptico) (Gaven e Bannerot, 1984). Esses erros impedem

que toda a irradiação solar atinja à abertura da cavidade do receptor, dando origem ao fenômeno conhecido como dispersão como é mostrado na figura 4.12 (Gavilán, 2007).

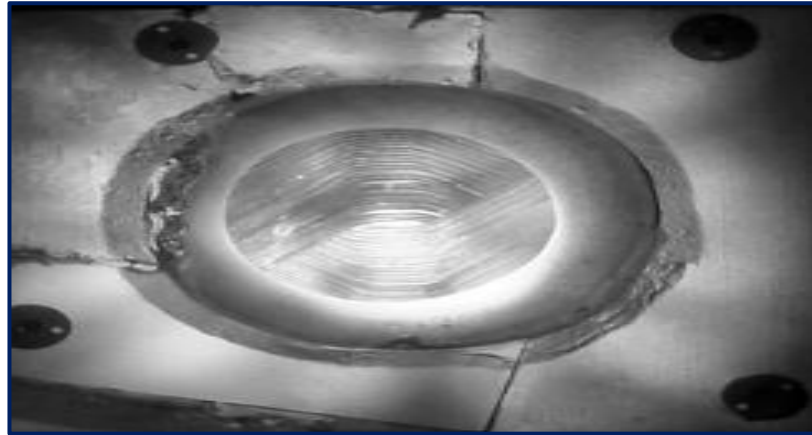


Figura 4.12 Erro de dispersão num receptor de energia solar. (Gavilán, 2007)

4.8.2 Imagem solar no receptor

Os raios do sol não são completamente paralelos ao eixo do concentrador parabólico, devido à distância Terra-Sol. O diâmetro solar sustenta um ângulo $\alpha = 32'$, fazendo com que a irradiação solar que atinge a superfície do receptor não seja pontual, mas se projeta como uma região elíptica como é mostrada na figura 4.13. Para obter uma imagem bem definida do sol, o parabolóide deve ter um comprimento focal grande em relação ao diâmetro da abertura, mas um longo comprimento focal necessita de um seguimento solar mais preciso (Howell e Siegel, 2002).

Quando o comprimento focal é curto em comparação com o diâmetro da abertura, as imagens elípticas são formadas pela reflexão a partir da borda do espelho, exceto em uma pequena região perto do centro do espelho (Howell e Siegel, 2002). Uma reflexão sem distorção ocorre quando:

$$D_{ims} = 2f * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{f}{107,3} \quad (4-75)$$

Onde:

D_{ims} = Diâmetro da imagem do Sol sem distorção

Então, a área da imagem solar sem distorção é:

$$A_{ims} = \pi \left(f \tan \frac{\alpha}{2} \right)^2 = \pi f^2 \frac{\alpha^2}{4} \quad (4-76)$$

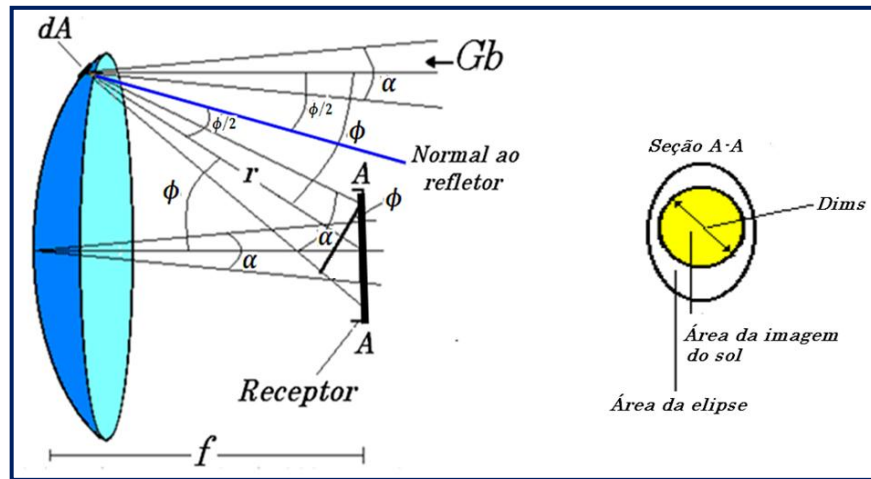


Figura 4.13 Imagens formadas no plano focal do concentrador solar (Howell e Siegel, 2002)

Além disso, a área da elipse A_e é obtida pela projeção da imagem solar formada na secção transversal definida por um ângulo ϕ a uma distância r .

$$A_e = \pi r^2 \frac{\alpha^2}{4 \cos \phi} \quad (4-77)$$

Para a imagem (Área da elipse) da figura 4.13, a fração aproximada de energia solar incidente de fluxo G_b compreendida no cone angular α encontrada dentro da imagem solar é (assumindo uma iluminação uniforme sobre toda a elipse):

$$\frac{A_{ims}}{A_e} = \frac{\pi f^2 \frac{\alpha^2}{4}}{\pi r^2 \frac{\alpha^2}{4 \cos \phi}} = \left(\frac{f}{r}\right)^2 \cos \phi \quad (4-78)$$

A energia por unidade de tempo Q_r incidente no plano focal e dentro da imagem solar é:

$$dQ_r = G_b * \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) * \rho * \left(\frac{f}{r}\right)^2 \cos \phi * dA \quad (4-79)$$

Onde:

ρ = Refletividade

Q_r = Energia por unidade de tempo [W]

G_b = Irradiação solar [W/m²]

ϕ = Fator de configuração geométrica

Onde o elemento de área dA na borda do parabolóide pode ser expresso por:

$$dA = 2 * \pi * r * \sin \phi * \sqrt{[(dr)^2 + (rd\phi)^2]} \quad (4-80)$$

Também pode ser expresso como:

$$dA = 2 * \pi * r * \sin \phi * rd\phi \sqrt{\left[\left(\frac{dr}{rd\phi}\right)^2 + (1)^2\right]} \quad (4-81)$$

Utilizando parâmetros definidos acima, pode-se deduzir que:

$$dA = 2 * \pi * r^2 * \sin \phi * d\phi \sqrt{\left[\tan^2\left(\frac{\phi}{2}\right) + (1)^2\right]} \quad (4-82)$$

Para teoremas trigonométricos, tem-se:

$$dA = 2 * \pi * r^2 * \sin \phi * d\phi * \sec\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (4-83)$$

Substituído na equação dQ_r :

$$dQ_r = G_b * \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) * \rho * \left(\frac{f}{r}\right)^2 * \cos \phi * 2 * \pi * r^2 * \sin \phi * d\phi * \sec\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (4-84)$$

Simplificando:

$$dQ_r = 2 * \pi * G_b * f^2 * \rho * \sin \phi * \cos \phi * d\phi \quad (4-85)$$

Para determinar a energia por unidade de tempo que atinge o receptor é realizado uma integral de ϕ_{min} (ângulo causado pela sombra do receptor) até ϕ_r (Ângulo da borda) (Howell e Siegel, 2002).

$$\int dQ_r = 2 * \pi * f^2 * \rho * G_b \int_{\phi_{min}}^{\phi_r} \sin \phi * \cos \phi * d\phi \quad (4-86)$$

Integrando, tem-se:

$$Q_r = \pi * f^2 * \rho * G_b * (\sin^2 \phi_r - \sin^2 \phi_{min}) \quad (4-87)$$

Usando a equação (4-71):

$$f_0 = \frac{D_p}{4 \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right)} \quad (4-88)$$

E substituindo a equação (4-58) em (4-88):

$$f^2 = \frac{A_a}{4 * \pi * \tan^2\left(\frac{\phi_r}{2}\right)} \quad (4-89)$$

Substituída a equação (4-89) na equação (4-87); a energia por unidade de tempo incidente sobre o plano focal é:

$$Q_r = \frac{(\sin^2 \phi_r - \sin^2 \phi_{min})}{4 * \tan^2 \left(\frac{\phi_r}{2} \right)} \rho * A_a * G_b \quad (4-90)$$

A máxima energia por unidade de tempo é obtida substituindo a equação (4-73) na equação (4-87):

$$Q_{rmax} = \pi \frac{D_r^2}{4} * \frac{(\sin^2 \phi_r - \sin^2 \phi_{min})}{4 * \tan^2 \left(\frac{\phi_r}{2} \right)} * C_{max} * \rho * G_b \quad (4-91)$$

4.8.3 Refletância especular

Como discutido na seção 2.2.1, a refletância especular é a relação entre o ângulo do cone de radiação solar incidente com relação ao ângulo do cone da radiação refletida. A causa de uma diferença angular é devido à natureza da superfície do espelho (rugosidade, defeitos na localização das placas, etc.). O ângulo de incidência solar é 32' de arco, de modo que o ângulo refletido será 32' + 2Δθ de arco (0 < Δθ) (Rabl, 1978):

$$\epsilon' = 32' + 2\Delta\theta \quad (4-92)$$

Δθ: É o desvio angular do raio central.

A distribuição real do fluxo de radiação solar da superfície de absorção difere da distribuição esperada ideal, onde a distorção é produzida pelas seguintes razões (Rabl, 1978):

- Erros de pequena escala ou irregularidades na superfície do refletor, causando dispersão da imagem e produzindo uma perda de energia na entrada da cavidade do receptor. Para minimizar este efeito são utilizadas folhas de alumínio anodizado, camadas de plástico metalizado ao vazio e superfícies de vidro laminado.
- Erros macroscópicos no refletor que produzem distorção na imagem solar se devem à falta de rigidez da estrutura e fatores de forma.
- Erros na posição relativa do absorvedor frente ao refletor.
- Erros na orientação do sistema de coleta em relação ao fluxo da irradiação solar para minimizar este efeito são usados sistemas de monitoramento eletrônico e sistemas de controle.

Capítulo 5.

BALANÇO TÉRMICO

5.1 BALANÇO DE ENERGIA NO RECEPTOR

Considerando que a abertura do espelho coletor dada pela equação (4-57) do capítulo anterior, recebe a luz solar Q_s proporcional à área do coletor $A_{abertura}$ e à insolação direta normal por unidade de área de captação, conforme mostrado na figura (5.1). Esta análise assume que o sistema em estado estacionário (Wua et al, 2009), isto é:

$$Q_s = G_b * A_{abertura} \quad (5-1)$$

Onde:

Q_s = Energia solar incidente sobre a abertura do espelho coletor [J/s]

G_b = Irradiação solar [W/m^2]

Para condições de estado estacionário, o calor útil emitido por um sistema coletor solar é igual à energia absorvida pelo fluido de transferência de calor. O receptor do sistema Dish/Stirling é responsável pela maioria das perdas de calor antes da etapa de conversão da energia solar em eletricidade. A quantidade de energia útil é determinada pelo balanço de energia, representado na figura 5.2 (Wua et al, 2009):

$$Q_{util} = Q_{abs} - Q_{perd} = Q_{abs} - (Q_{Radiação} + Q_{Convecção}) \quad (5-2)$$

Onde:

- Q_{util} = Energia útil captada no coletor [J/s]
 Q_{abs} = Energia absorvida no absorvedor [J/s]
 $Q_{Radiação}$ = Perdas por radiação [J/s]
 $Q_{Convecção}$ = Perdas por convecção [J/s]

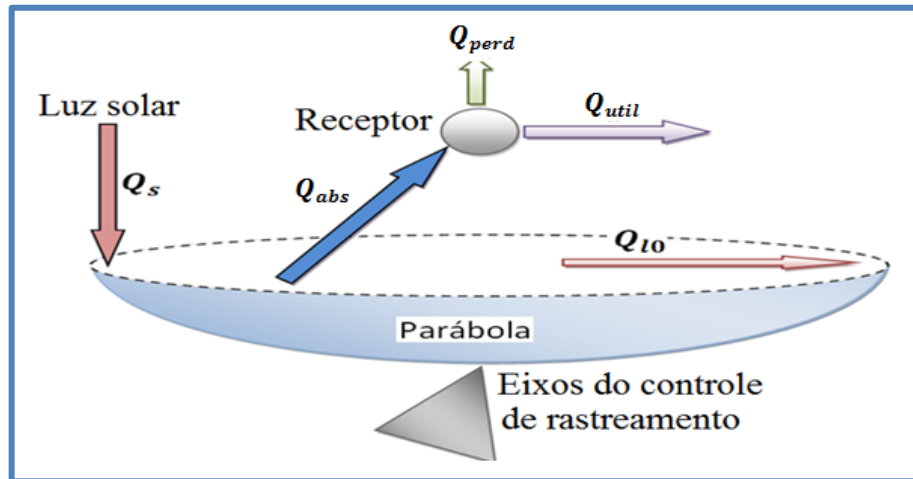


Figura 5.1 Esquema do balanço térmico do coletor parabólico Stirling (Wua et al, 2009)

5.1.1 Eficiência ótica de um coletor parabólico

O desempenho ótico é definido como a relação entre a radiação que intercepta a superfície do absorvedor e a radiação incidente sobre a área de abertura do coletor. O rendimento ótico é limitado pelas seguintes razões (Jaramillo S, 1998):

- ✓ Rastreamento solar impreciso.
- ✓ Perdas por efeito da sombra, devido à estrutura que contém o receptor. Geralmente é inferior a 1% de sombra.
- ✓ Perdas por refletividade. Um espelho limpo feito com materiais com baixo conteúdo de ferro e revestimento de prata fornece uma refletividade de 90-94% (Silva, 2004).
- ✓ Perdas de transmissão-absorção, cerca do 2,4 %.
- ✓ Perdas de reflexão-absorção, cerca do 5-8 %.
- ✓ Perdas por dispersão da radiação que atinge a abertura da cavidade do receptor e causa cerca de 1-3% de perda adicional.

A eficiência ótica esta definida como:

$$\eta_o = [f_s * \rho * \gamma * \cos \theta_i] * \tau_{abs} * \alpha_{abs} * F \quad (5-3)$$

Onde:

η_o = Eficiência ótica

f_s = Fator de não sombreamento

ρ = Refletividade

γ = Fator de configuração geométrica

$\cos \theta_i$ = Fator de seguimento solar

τ_{abs} = Transmitância

α_{abs} = Absorbância do absorvedor

F = Erro de dispersão

5.1.2 Energia no absorvedor

A função do absorvedor é receber todos os raios do sol emitidos no coletor. Esta energia absorvida no receptor esta determinada pela relação (Wua et al., 2009):

$$Q_{abs} = \eta_o * A_{abertura} * G_b \quad (5-4)$$

Substituindo a eficiência ótica da equação (5-3) em Q_{abs} fica:

$$Q_{abs} = [f_s * \rho * \gamma * \cos \theta_i] * \tau_{abs} * \alpha_{abs} * F * A_{abertura} * G_b \quad (5-5)$$

Sem considerar as perdas por dispersão na cavidade do receptor e seguimento perfeito, assumimos que $F=1$ e $\cos \theta_i=1$, então a equação (5-5) fica:

$$Q_{abs} = \tau_{abs} * \alpha_{abs} * (f_s * \gamma * \rho * G_b * A_{abertura}) \quad (5-6)$$

$$Q_{abs} = \tau_{abs} * \alpha_{abs} * Q_r \quad (5-7)$$

5.1.3 Energia máxima no receptor por unidade do tempo

Durante o cálculo da máxima energia por unidade de tempo no receptor, deve-se ter em conta o fator de sombra e a configuração geométrica, mostrada na figura 5.2.

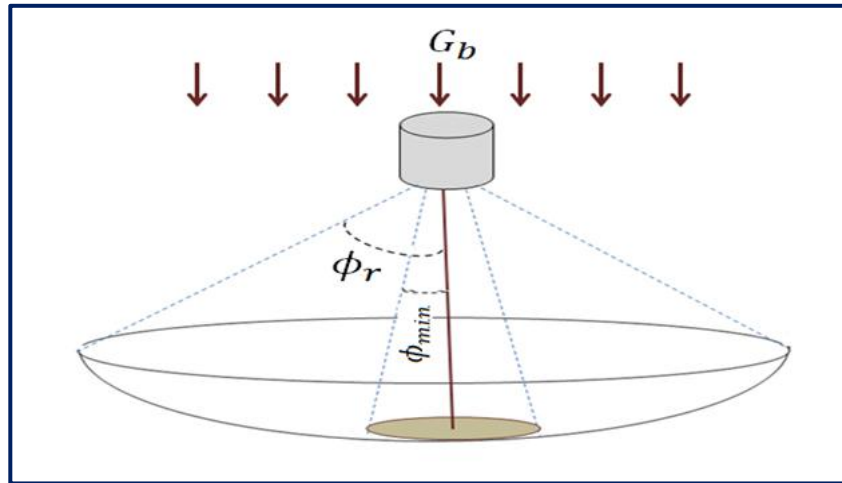


Figura 5.2 Sombra causada pelo receptor (Jaramillo S, 1998)

Estes parâmetros ótico-geométricos são deduzidos igualando a equação (5-6) “Energia no absorvedor” com a equação (4-90) do capítulo anterior, “Energia por unidade de tempo”.

$$\tau_{abs} * \alpha_{abs} * (f_s * \gamma * \rho * G_b * A_{abertura}) = Q_r = \frac{(\sin^2 \phi_r - \sin^2 \phi_{min})}{4 * \tan^2(\frac{\phi_r}{2})} \rho * A_{abertura} * G_b \quad (5-8)$$

Isolando o fator $f_s * \gamma$ da equação (5-8) fica:

$$f_s * \gamma = \frac{(\sin^2 \phi_r - \sin^2 \phi_{min})}{4 * \tan^2(\frac{\phi_r}{2})} \quad (5-9)$$

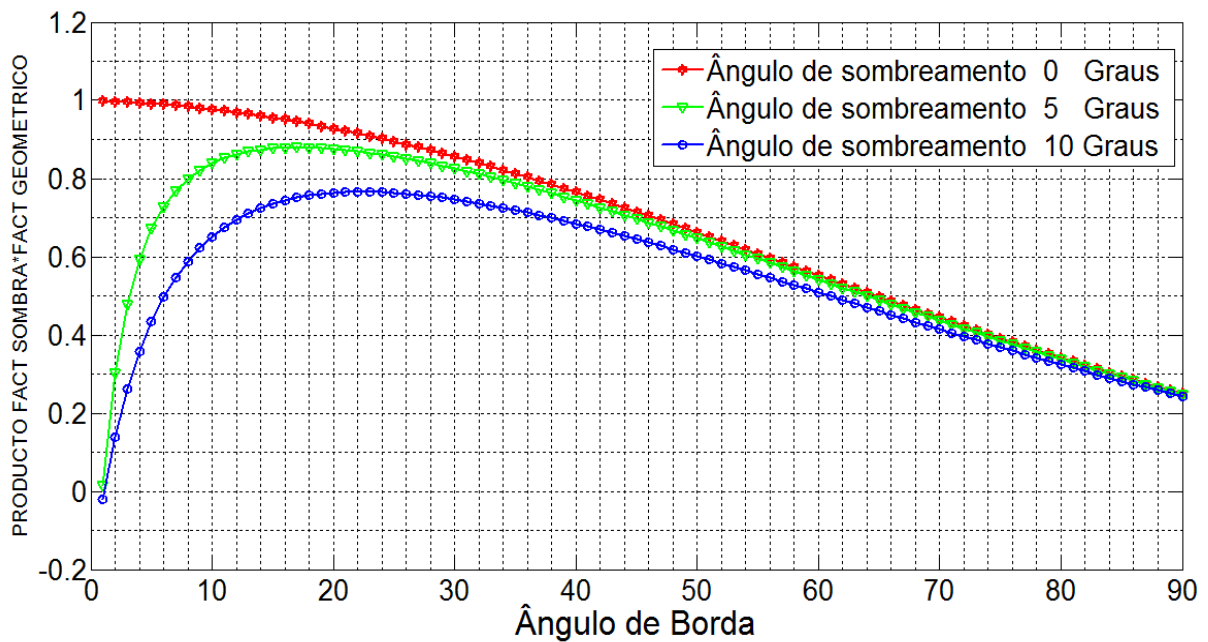


Figura 5.3 Comportamento do fator $f_s * \gamma$ em função do ângulo de borda (Jaramillo S, 1998)

A figura 5.3, mostra o fator de decaimento $f_s * \gamma$ ao aumentar gradualmente o ângulo de borda ϕ_r . Este comportamento é devido ao tamanho finito do Sol, que é refletido na superfície do refletor parabólico, produzindo imagens elípticas no plano focal (Jaramillo S, 1998).

5.2 EFICIÊNCIA INSTANTÂNEA DO COLETOR

A eficiência instantânea do coletor é definida como:

$$\eta_{c,inst} = \frac{Q_{util}}{A_{abertura} * G_b} \quad (5-10)$$

Onde:

$\eta_{c,inst}$ = Eficiência instantânea

Substituindo a equação (5-2) na equação (5-10):

$$\eta_{c,inst} = \frac{Q_{abs}}{A_{abertura} * G_b} - \frac{Q_{perd}}{A_{abertura} * G_b} \quad (5-11)$$

E substituindo a equação (5-4) na equação (5-11):

$$\eta_{c,inst} = \eta_o - \frac{Q_{perd}}{A_{abertura} * G_b} \quad (5-12)$$

Da equação (5-12) pode-se concluir que para melhorar a eficiência do coletor, deve ser melhorada a eficiência ótica, diminuir as perdas de calor e aumentar a concentração. Os sistemas solares de alta concentração são sensíveis às propriedades óticas (Wua et al., 2009).

5.3 EFICIÊNCIA DO COLETOR

A principal medida da eficiência do coletor ou concentrador é a quantidade de radiação solar que atinge a abertura da superfície do espelho coletor e passa através de uma abertura de tamanho especificado localizado no foco concentrador (Stine e Diver, 1994).

A eficiência então é definida como:

$$\eta_{coletor} = f_s (\cos\theta_i) \rho \phi \quad (5-13)$$

f_s : Abertura sem sombra, normalmente é +/- 95%.

5.4 TEMPERATURA TEÓRICA NO RECEPTOR

Para encontrar a temperatura teórica no receptor, utiliza-se a seguinte equação (5-14) que está em função da radiação solar que atinge o receptor, da relação de concentração máxima e dos efeitos geométricos do Coletor/Receptor (Steinfeld e Palumbo, 2001).

$$T_{teorica} = \sqrt[4]{\frac{G_b * C_{max} * \alpha_{abs}}{\sigma * \epsilon}} \quad (5-14)$$

A figura 5.4, mostra a variação da temperatura teórica em função à concentração solar para diferentes materiais no receptor, mantendo constante absorvância em 1 e variando a emissividade. Observa-se que os valores de temperaturas para condições ideais são valores muito elevados.

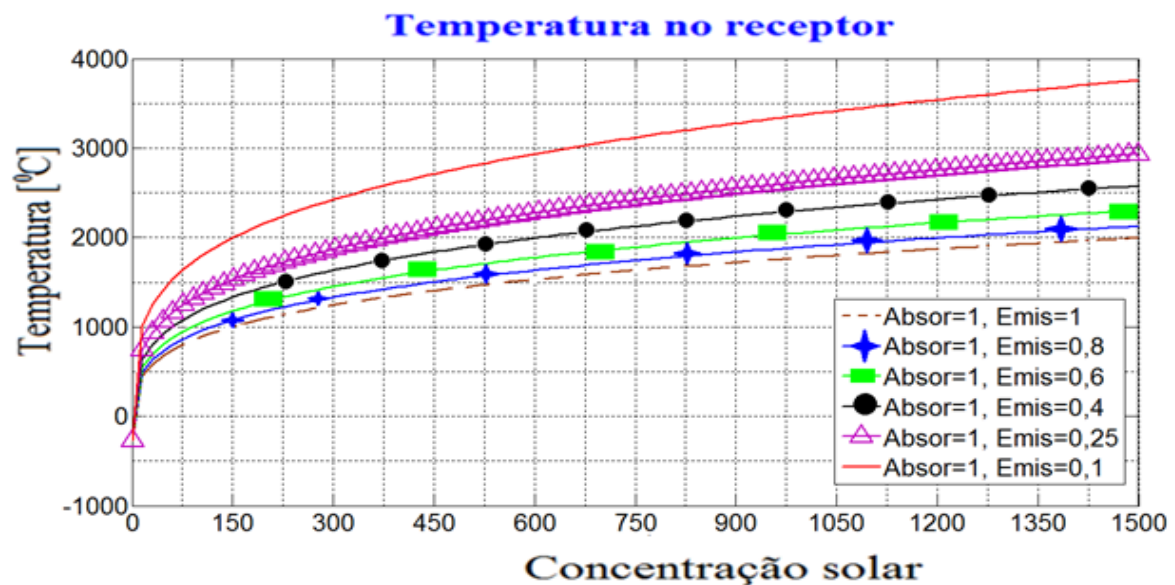


Figura 5.4 Variação de temperatura no receptor em função das propriedades dos materiais e a concentração solar.

A Segunda Lei da Termodinâmica limita a temperatura do receptor à temperatura da fonte. No entanto há outros fatores (fator de sombra, fator geométrico, tipo de material

utilizado, etc.) que aumentam as perdas quando se atingem altas temperaturas. A figura 5.5, mostra a variação da temperatura na superfície do receptor em função da concentração de energia solar para diferentes valores de $K_{\text{atenuação}}$, responsável por limitar a temperatura, que é necessário para evitar a degradação sofrer os materiais submetidos a altas temperaturas. O fator $K_{\text{atenuação}}$ é representado por fatores geométricos e de resfriamento (ventilação forçada ou resfriamento com água).

$$T_{\text{teórica}} = \sqrt[4]{\frac{G_b * C_{\text{max,Real}} * \alpha_{\text{abs}} * K_{\text{atenuação}}}{\sigma * \varepsilon}} \quad (5-15)$$

Onde $K_{\text{atenuação}}$ está representada pelos seguintes fatores:

$$K_{\text{atenuação}} = \gamma * F_s * F_t * F_{\text{deterioro}} * E_d * E_{\text{desb}} * R_{\text{refrig}} \quad (5-16)$$

Onde:

R_{refrig} = Coeficiente de resfriamento

E_{desb} = Erro de transbordamento

E_d = Erro de dispersão

$F_{\text{deterioro}}$ = Fator de degradação

F_t = Fator de área sombreada

F_s = Fator de área não sombreada

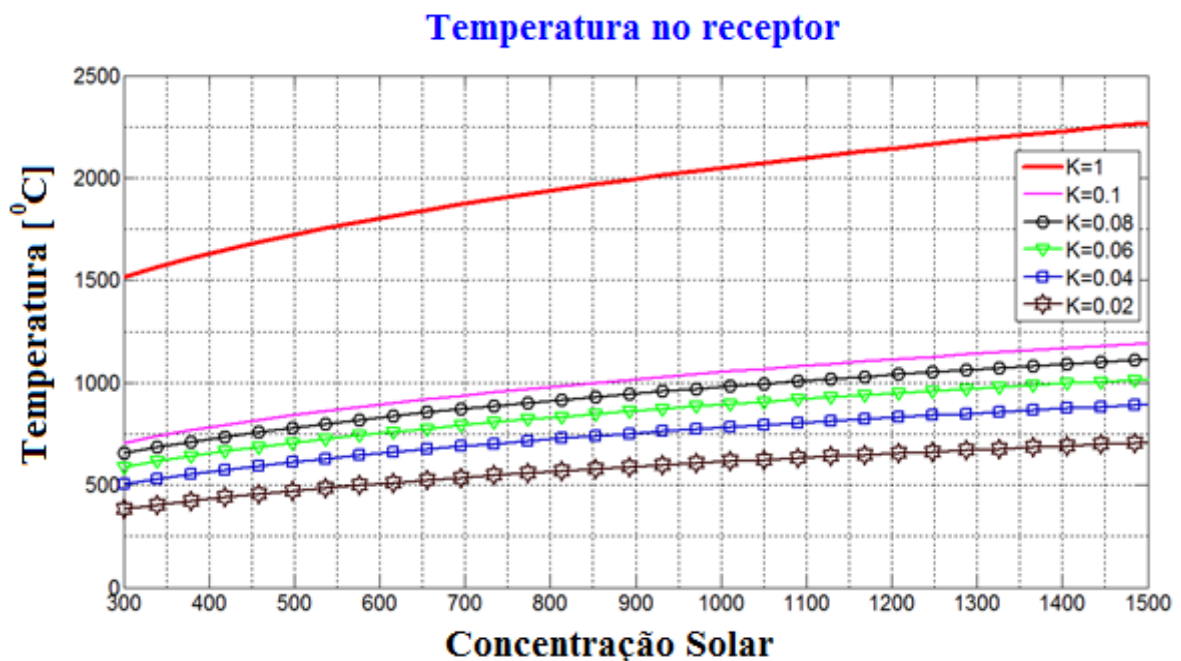


Figura 5.5 Variação de temperatura no receptor para diferentes fatores de $K_{\text{atenuação}}$

A figura 5.6, mostra a variação da temperatura teórica no receptor para um dia típico na cidade de Itajubá, onde a temperatura teórica máxima atinge 1050 Kelvins.

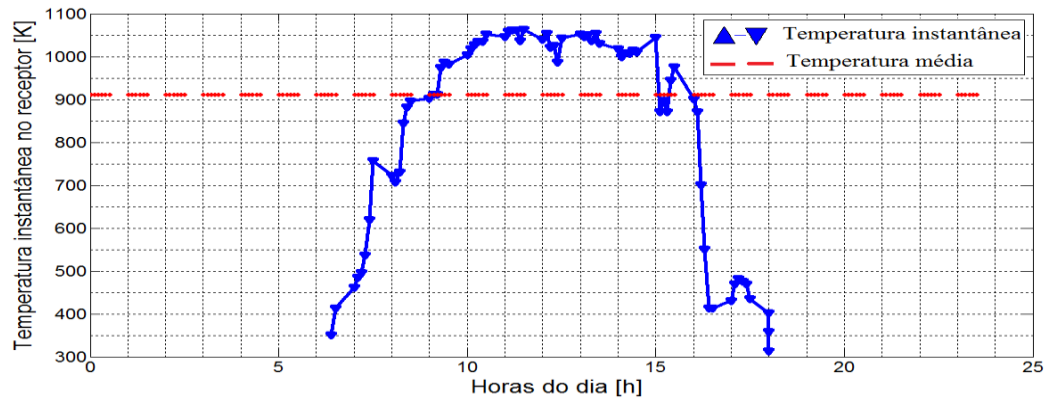


Figura 5.6 Variação de temperatura teórica no receptor para condições de insolação típica da cidade de Itajubá no dia 15/04/2010

5.5 PERDAS POR RADIAÇÃO

Considerando que as perdas do prato coletor são desprezíveis, o estudo se concentrará no balanço de energia na superfície do receptor. Assumindo que a temperatura alcançada na superfície do receptor devido à concentração solar é T_{recept} , as perdas por radiação são apresentadas da seguinte forma (Wua et al., 2009):

$$Q_{rh} = \varepsilon * \sigma * A_r * (T_r^4 - T_{sky}^4) \quad (5-17)$$

Onde:

ε : Emissividade da superfície do absorvedor

σ : Constante Stefan-Boltzmann dada por:

$$\sigma = 5,667 * 10^{-8} \left[W / (m^2 * K^4) \right] \quad (5-18)$$

T_{sky} : Temperatura do ar [K]:

$$T_{sky} = 0.055T_a^{1.5} \quad (5-19)$$

T_r : Temperatura do receptor [K]

T_a : Temperatura do ambiente [K]

As perdas por radiação para o dia 15/04/2010 são mostradas na figura 5.7.

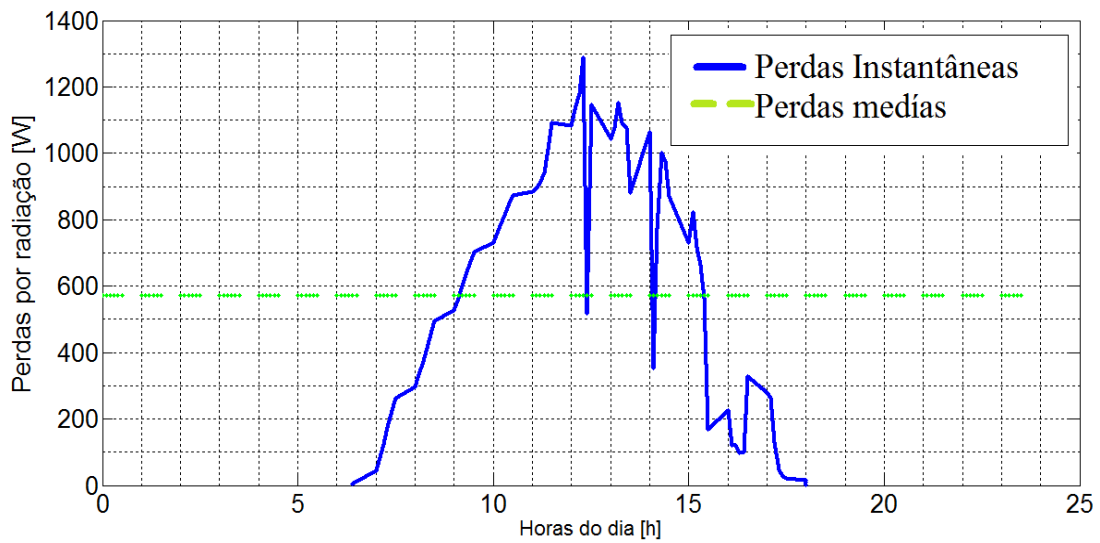


Figura 5.7 Variação das perdas por radiação para condições de insolação típica da cidade de Itajubá no dia 15/04/2010

5.6 PERDAS POR CONVECÇÃO

As perdas por convecção estão dadas por (Bancha e Somchai, 2005):

$$Q_{rh} = h_c * A_r * (T_r - T_a) \left[\frac{W}{m^2 * K} \right] \quad (5-20)$$

Onde:

h_c : Coeficiente de transferência de calor por convecção

O coeficiente de transferência de calor por convecção h_c depende da velocidade do vento no local, além disso, seu cálculo é influenciado pelo acabamento da superfície do coletor e da incidência do fluxo de ar. Para superfícies lisas, a equação é dada como (Bancha e Somchai, 2005):

$$h_c = 7,120 * v_{20}^{0,775} + 5,129 \exp(-0,6v_{20}) \quad (5-21)$$

Onde, v_{20} é a velocidade do ar em m/s a uma temperatura 293 K ou 20 °C

Portanto:

$$v_{20} = 293 \frac{v}{T} \quad (5-22)$$

v : Velocidade média do ar a uma temperatura T .

A variação da velocidade do vento para o dia 15/04/2010 na cidade de Itajubá é mostrada na figura 5.8.

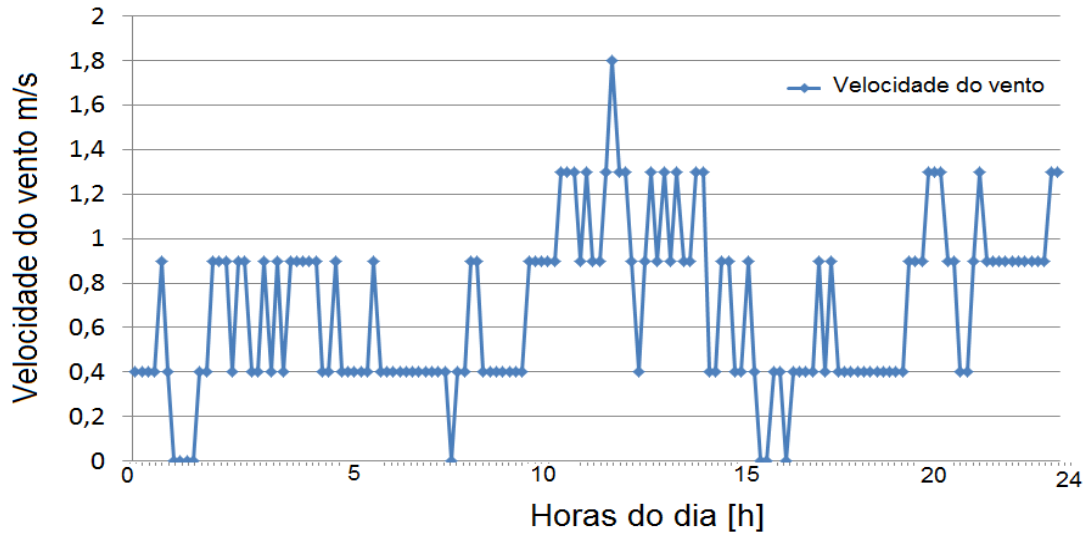


Figura 5.8 Variação da velocidade do vento no dia 15/04/2010

Para superfícies lisas onde um fluxo de ar incide na superfície do receptor, o cálculo do coeficiente de convecção é o seguinte (Bancha e Somchai, 2005):

$$h_c = 16,9 * v^{0,45} \quad (5-23)$$

As perdas por convecção para o dia 15/04/2010 são mostradas na figura 5.9.

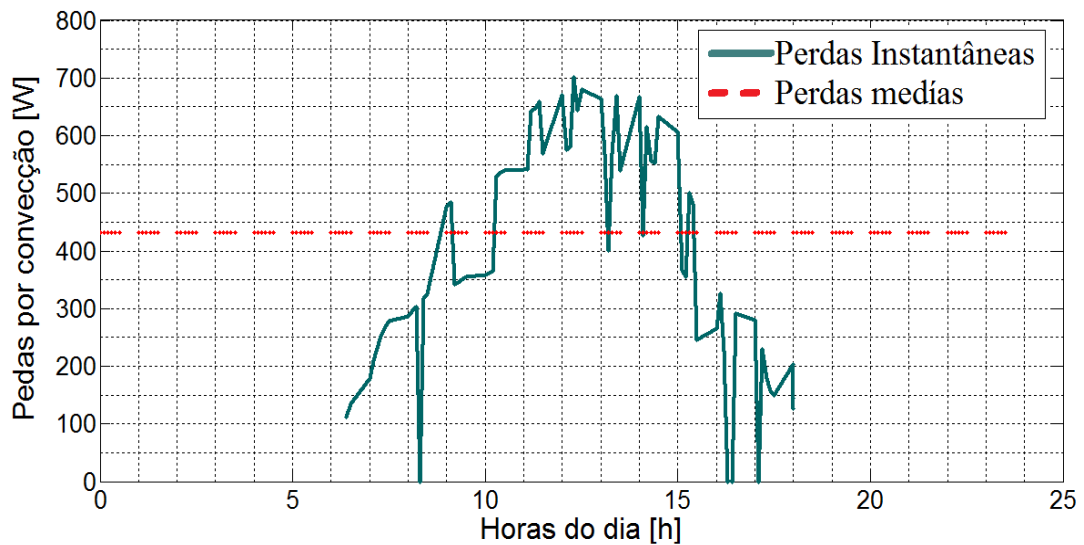


Figura 5.9 Variação das perdas de convecção para condições de insolação típica da cidade de Itajubá no dia 15/04/2010

5.7 ENERGIA ÚTIL NO COLETOR

A equação de balanço de energia chamada equação fundamental da concentração solar rege o desempenho de todos os sistemas captadores solares e serve como um parâmetro de projeto. A equação fundamental do coletor solar em função das perdas da radiação e das perdas por convecção é (Stine e Diver, 1994):

$$Q_u = Q_{abs} - Q_{perd} \quad (5-24)$$

$$Q_u = G_{b,n} A_a E (\cos \theta_i) \rho \phi \tau \alpha - A_{rec} [U(T_{rec} - T_{amb}) + \sigma F(T_{rec}^4 - T_{amb}^4)] \quad (5-25)$$

O primeiro termo da equação (5-24), mostra que a quantidade de irradiação solar que atinge ao receptor depende da eficiência ótica e da quantidade de energia que é refletida ao receptor (determinado por $G_{b,n}$ e $\cos \theta_i$), tamanho efetivo do concentrador (determinado por A_c e E) e reflexão da superfície do coletor (determinado por ρ). O desempenho do receptor térmico depende do projeto (determinado por τ e α) e das perdas por condução, convecção e radiação de calor (Stine e Diver, 1994).

5.8 DESEMPENHO DO RECEPTOR

A radiação solar tem uma qualidade termodinâmica elevada, que é reduzida ao atingir a superfície da terra, devido à redução na intensidade solar pela atmosfera. Este inconveniente é refletido diretamente na eficiência de sistemas de alta concentração, que através da diminuição da densidade de fluxo diminui o grau de concentração de calor e o rendimento no receptor. Este inconveniente pode ser melhorado utilizando sistemas de concentração pontuais, aumentando a densidade de fluxo de calor em uma área menor, melhorando o rendimento do receptor (CIEMAT, 2009).

A eficiência do receptor pode ser calculada a partir das expressões mostradas na Tabela 5.1, onde se pode ter em conta as condições meteorológicas reais como: a velocidade do vento temperatura ambiente e a irradiação solar diária.

Tabela 5.1 Metodologia para a determinação da eficiência do receptor

$$\eta_{rec} = \tau * \alpha_{abs} - \frac{h_c(T_{rec}-T_{amb}) + \sigma \varepsilon (T_{rec}^4 - T_{amb}^4)}{\eta_{conc} C_{Geom} G_b} \quad (5-26) \quad (\text{Stine e Diver, 1994})$$

$$\eta_{rec} = \tau * \alpha_{abs} + \alpha_{abs} * \varepsilon \frac{\sigma T_{rec}^4}{C_{Geom} * G_b} - \varepsilon \rho \frac{\sigma T_{amb}^4}{C_{Geom} * G_b} - \frac{h_c(T_{rec}-T_{amb})}{C_{Geom} G_b} \quad (5-27) \quad (\text{CIEMAT, Plataforma Solar de Almería, 2009})$$

$$\eta_{rec} = \frac{G_b * A_{rec} * C_{Geom} - \sigma \varepsilon A_{rec} (T_{rec}^4 - T_{amb}^4) - h_c A_{rec} (T_{rec} - T_{amb})}{G_b A_{colector}} \quad (5-28) \quad (\text{Bancha e Somchai, 2005})$$

Quando a concentração de energia solar é mais elevada, aumenta a densidade do calor e, portanto melhora o desempenho do sistema solar térmico (CIEMAT, 2009). A equação (5-27) pode ser interpretada da seguinte forma:

- $\tau * \alpha_{abs}$ → Ganho de energia devido à energia que atinge o receptor e é capaz de absorvê-la aumentando o calor em toda a superfície.
- $\alpha_{abs} * \varepsilon \frac{\sigma T_{rec}^4}{C_{Geom} * G_b}$ → Ganhos procedentes da cobertura na cavidade do receptor, devido ao efeito do material.
- $-\varepsilon \rho \frac{\sigma T_{amb}^4}{C_{Geom} * G_b}$ → Perdas por radiação do absorvedor devido à emissividade e refletividade do material de fabricação.
- $-\frac{h_c(T_{rec}-T_{amb})}{C_{Geom} G_b}$ → Perdas por convecção entre o absorvedor e o ambiente

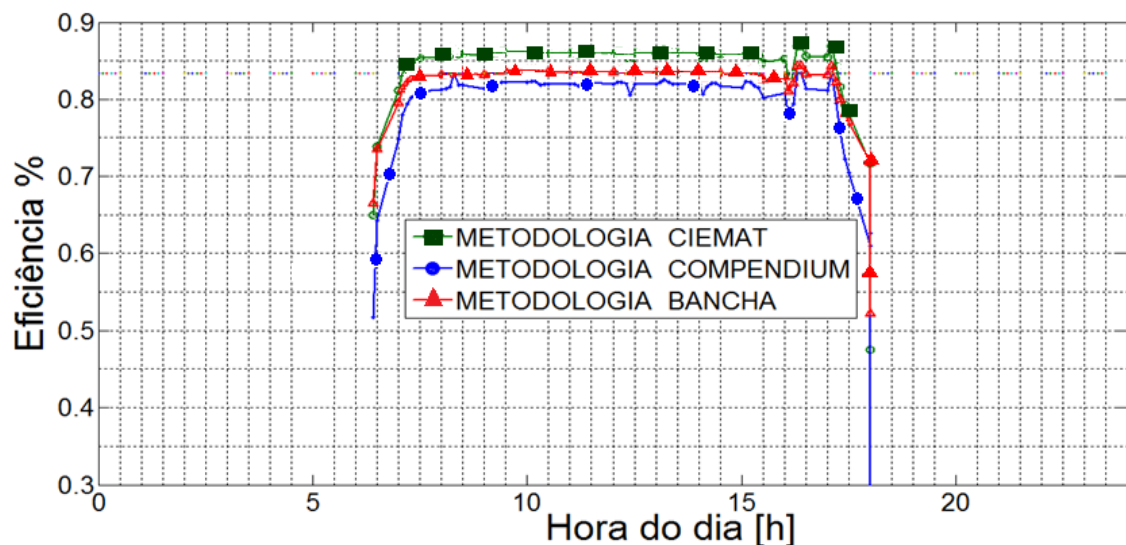


Figura 5.10 Variação na eficiência do receptor calculada por três metodologias diferentes, para condições de insolação típica da cidade de Itajubá no dia 15/04/2010.

Na figura 5.10, observa-se a variação da eficiência do receptor para as condições climáticas reais na cidade de Itajubá (15/04/2010), onde seu valor de eficiência oscila entre 82 e 85%, devido ao alto valor da temperatura teórica no receptor de 780 °C e o alto valor de concentração solar de 2500 soles tendo em conta o material seletivo do receptor de ($\alpha_{abs}/\varepsilon = 4,4$).

5.9 MOTOR STIRLING

O motor Stirling é chamado de motor de combustão externa, mas o calor fornecido ao motor não é necessariamente proveniente de uma combustão. O motor Stirling pode ser adequado para aplicações solares, mas o aspecto crítico deste motor alimentado por energia solar é o projeto do coletor solar associado, porque ele tem que fornecer a quantidade de calor para que se atinja a temperatura ótima de operação (Batista, 2007). O elemento mais destacado do motor é o chamado regenerador. Este elemento tem a propriedade de absorver e ceder calor nas evoluções a volume constante do ciclo. O regenerador é um meio poroso, com condutividade térmica desprezível, o qual divide o motor em duas zonas: zona quente e zona fria. O fluido desloca-se da zona quente para a zona fria ao longo dos diversos ciclos de trabalho, atravessando o regenerador (Bergamasco, 2007). O motor utiliza um fluido compressível como o ar, hidrogênio, hélio ou nitrogênio, trabalhando em um ciclo fechado chamado Stirling (Banca e Somchai, 2005).

Existe a possibilidade de utilização de vários tipos de combustíveis no motor Stirling, (gás natural, óleo combustível, biomassa, diesel, gasolina, álcool, solar, entre outros), que é um grande atrativo para o seu desenvolvimento (Wilke e Lora, 2004). Outras vantagens são:

- ✓ Operação silenciosa - não há combustão no seu interior;
- ✓ Baixo desgaste interno no consumo de lubrificante e manutenção - o fluido de trabalho não entra em contato com o combustível. Evitando-se assim, a contaminação do mesmo (Wilke e Lora, 2004);
- ✓ Eficiência global em torno de 30% - o que pode tornar o motor Stirling competitivo com outras tecnologias (Wilke e Lora, 2004);
- ✓ Vida útil esperada em torno de 25000 h (Wilke e Lora, 2004);

- ✓ Possibilidade de operação em cogeração, neste caso a eficiência total, considerando a elétrica e térmica é em torno de 90% (Wilke e Lora, 2004);
- ✓ Diferentes arranjos físicos - os elementos essenciais em um motor Stirling são: dois cilindros, um para expansão e o outro para a compressão e três trocadores de calor (Wilke e Lora, 2004);

Como desvantagens podem ser citadas (Wilke e Lora, 2004):

- ✓ Necessidade de vedação perfeita - os motores Stirling necessitam de boa vedação das câmaras que contém o gás de trabalho para evitar a contaminação do gás de trabalho pelo lubrificante. O rendimento do motor é normalmente maior com altas pressões, conforme o gás de trabalho, porém quanto maior a pressão de trabalho, maior será a dificuldade de vedação do motor. Como exemplo pode-se citar o uso do hidrogênio, um gás cuja molécula é de reduzido tamanho em altas velocidades e com pressões de 20MPa (Cordeiro, 2002) apud (Wilke e Lora, 2004);
- ✓ Custo elevado; o motor Stirling é aproximadamente duas vezes mais caro se comparado a um motor a Diesel de mesma potência. O que encarece a fabricação é a produção de trocadores de calor ideal;

5.9.1 Ciclo do motor ideal

O princípio de funcionamento do motor Stirling é baseado em um ciclo fechado, onde o gás de trabalho é mantido dentro dos cilindros e o calor é adicionado e removido do espaço de trabalho através de trocadores de calor (Bergamasco, 2007). O ciclo ideal é válido para gases perfeitos, que diverge do ciclo real medido por instrumentos. Não obstante, encontra-se muito próximo do Ciclo de Carnot, que estabelece o limite teórico máximo de rendimento das máquinas térmicas (Batista, 2007).

O ciclo Stirling é composto pelos seguintes processos:

- No ponto 1, mostrado na figura 5.11, todo o fluido está no espaço de compressão à baixa temperatura e máximo volume, no entanto o espaço de expansão encontra-se no volume mínimo.

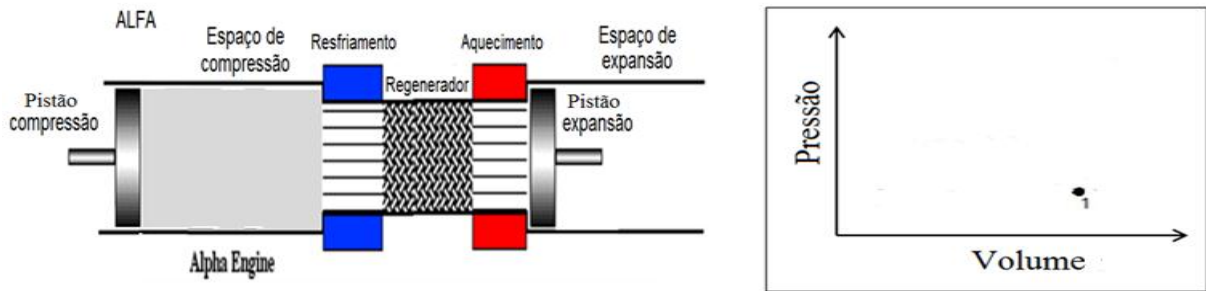


Figura 5.11 Volume máximo do fluido no espaço de compressão.

Adaptado de (Wakin, 2005).

- **1 → 2** Compressão Isotérmica (figura 5.12): Neste processo o pistão de compressão se move para direita, realizando trabalho de compressão sobre o fluido de trabalho, enquanto o calor é rejeitado para o sistema de resfriamento, mantendo a temperatura constante; (Wakin, 2005).

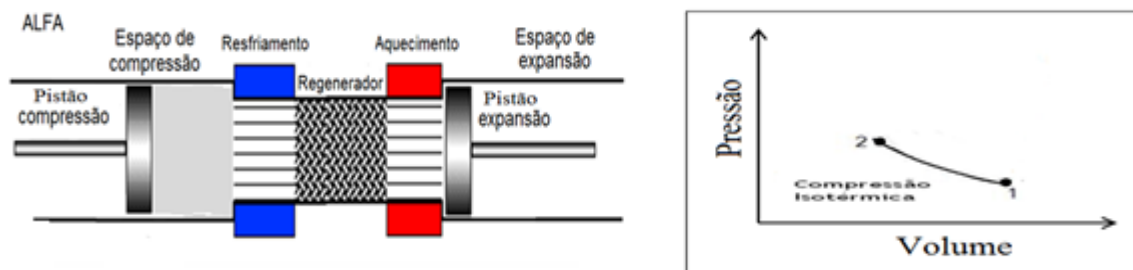


Figura 5.12 Volume mínimo do fluido no espaço de compressão.

Adaptado de (Wakin, 2005)

- **2→3** Aquecimento a volume constante (figura 5.13): O pistão de compressão vai até o ponto morto superior, enquanto o pistão de expansão se movimenta para a direita. Com isso o fluido de trabalho passa para o espaço de expansão, sendo aquecido pela fonte externa aumentando a pressão; (Wakin, 2005)

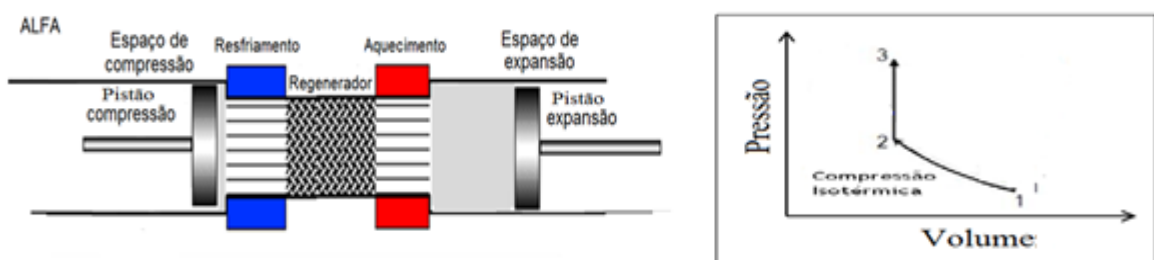


Figura 5.13 Volume mínimo do fluido no espaço de expansão.

Adaptado de (Wakin, 2005)

- **3→4** Expansão Isotérmica (figura 5.14): Neste processo, o pistão de expansão se move para esquerda, expandindo o fluido de trabalho e realizando trabalho. Este processo é realizado à temperatura constante, sendo que durante a expansão, o gás de trabalho recebe calor da fonte externa; (Wakin, 2005).

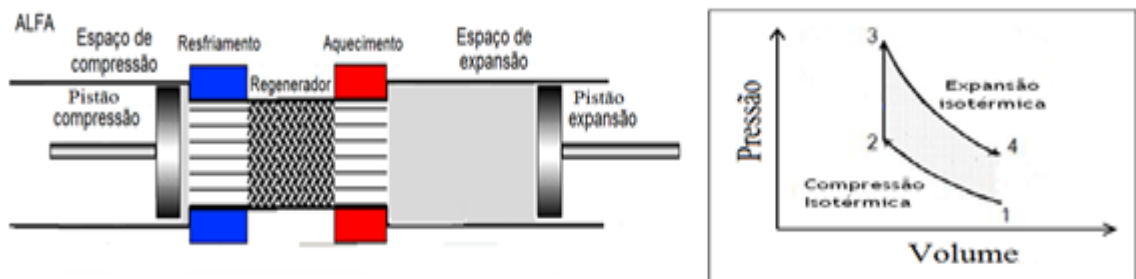


Figura 5.14 Volume máximo do fluido no espaço de expansão.

Adaptado de (Wakin, 2005)

- **4→1** Rejeição de calor a volume constante (figura 5.15): O pistão de compressão se movimenta até o ponto morto inferior, enquanto o pistão de expansão se movimenta para direita (Wakin, 2005).

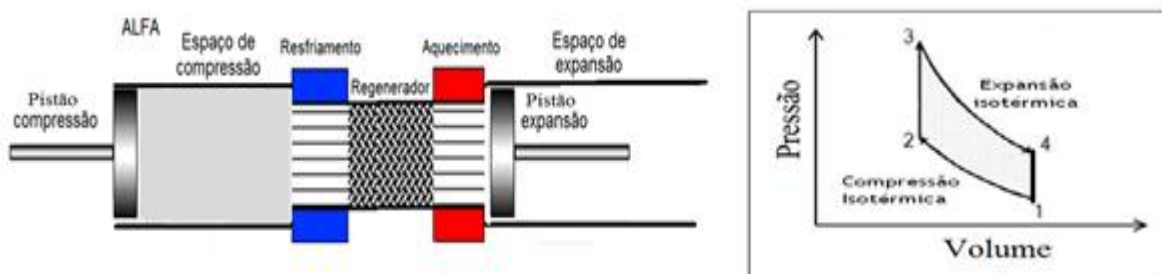


Figura 5.15 Volume máximo do fluido no espaço de compressão.

Adaptado de (Wakin, 2005)

O significado da regeneração pode ser visto na figura 5.16, diagrama T-S (Temperatura-Entropia ou Diagrama Entrópico). Note que a transferência de calor para o gás no processo (2-3) corresponde a área **2-3-b-a-2**, e é exatamente igual a transferência de calor do gás no processo (4-1), correspondente à área **1-4-d-c-1**. Assim, no ciclo ideal, todo o calor transferido ao ciclo " Q_H ", é fornecido no processo de expansão isotérmica (3-4) e todo o calor rejeitado " Q_L ", corresponde ao processo de compressão isotérmica (1-2). Como todas as transferências de calor ocorrem em processos isotérmicos a eficiência deste ciclo é igual à eficiência do ciclo de Carnot que opera entre as mesmas temperaturas (Batista, 2007).

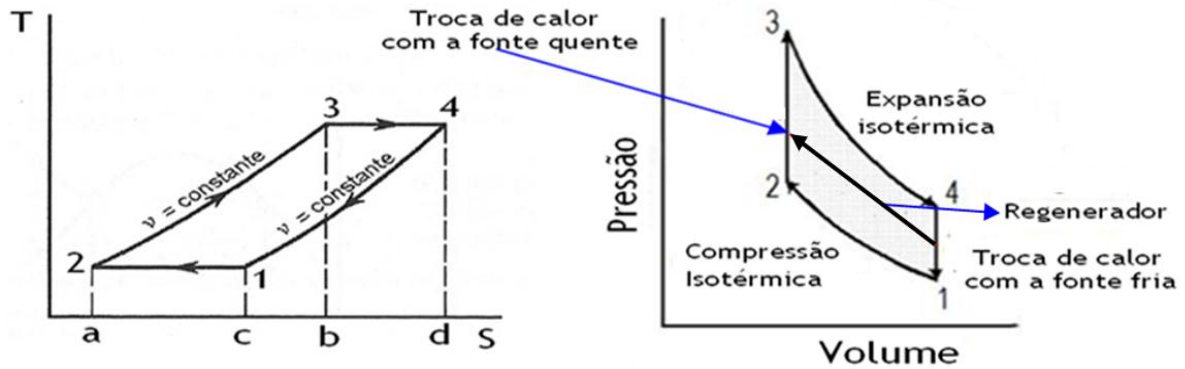


Figura 5.16 Ciclo termodinâmico do motor Stirling (Batista, 2007)

5.9.2 Trabalho realizado pelo ciclo do motor Stirling

Para calcular o trabalho realizado pelo ciclo, pode-se utilizar o diagrama P-V mostrado na figura 5.16, onde se obtém expressões diferentes (Enríquez e Guadalupe, 2011):

Processo 1-2; saída de calor a uma temperatura constante T_L

$$W_{1-2} = \int_{V_3}^{V_4} P * dv = \int_{V_3}^{V_4} \frac{R * T_L}{v} dv \quad (5-29)$$

Processo 2-3 acumulação de calor na regeneração a volume constante

$$W_{2-3} = \int_{V_2}^{V_3} P * dv = 0 \quad (5-30)$$

Processo 3-4; entrada de calor à temperatura constante T_H

$$W_{3-4} = \int_{V_3}^{V_4} P * dv = \int_{V_3}^{V_4} \frac{R * T_H}{v} dv \quad (5-31)$$

$$W_{3-4} = R * T_H * \ln\left(\frac{v_{max}}{v_{min}}\right) \quad (5-32)$$

Processo 4-1; regeneração a volume constante.

$$W_{4-1} = \int_{V_4}^{V_1} P * dv = 0 \quad (5-33)$$

A soma dos trabalhos W_{1-2} e W_{3-4} é o trabalho líquido do motor:

$$W_{liquido} = R * (T_H - T_L) * \ln\left(\frac{v_{max}}{v_{min}}\right) \quad (5-34)$$

5.9.3 Transferência de calor em um motor ideal

Para calcular o trabalho realizado pelo ciclo, é analisado cada ponto no diagrama.

P–V mostrado na figura 5.16, onde as expressões são obtidas como (Enríquez e Guadalupe, 2011):

Processo 1-2; saída de calor a uma temperatura constante T_L

$$dq = dU + PdV \quad (5-35)$$

$$q_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} C_V * dT + \int_{V_1}^{V_2} P * dv \quad (5-36)$$

C_v = Calor específico a volume constante, KJ/kg · K

$$q_{1-2} = w_{1-2} = R * T_L * \ln \left(\frac{v_{min}}{v_{max}} \right) \quad (5-37)$$

Processo 2-3 acumulação de calor na regeneração a volume constante

$$q_{2-3} = \int_{T_2}^{T_3} C_V * dT = C_V * (T_L - T_H) \quad (5-38)$$

Processo 3-4 entrada de calor à temperatura constante T_H

$$q_{3-4} = \int_{T_3}^{T_4} C_V * dT + \int_{V_3}^{V_4} P * dv \quad (5-39)$$

$$q_{3-4} = w_{3-4} = R * T_H * \ln \left(\frac{v_{max}}{v_{min}} \right) \quad (5-40)$$

Processo 4-1; regeneração a volume constante.

$$q_{4-1} = \int_{T_4}^{T_1} C_V * dT = C_V * (T_H - T_L) \quad (5-41)$$

O total de calor que entra no sistema corresponde, portanto ao processo 1-2

$$q_{entra} = R * T_H * \ln \left(\frac{v_{min}}{v_{max}} \right) \quad (5-42)$$

5.9.4 Eficiência do ciclo térmico

A eficiência do ciclo é a relação de trabalho líquido e calor fornecido, representado pelas seguintes equações (Enríquez e Guadalupe, 2011):

$$\eta = \frac{W_{liquido}}{Q_{entrada}} \quad (5-43)$$

$$\eta = \frac{R*(T_H - T_L)*\ln\left(\frac{v_{max}}{v_{min}}\right)}{R*T_H*\ln\left(\frac{v_{max}}{v_{min}}\right)} \quad (5-44)$$

Assim, a eficiência teórica é obtida:

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (5-45)$$

Na equação (5-45) é observado que a eficiência do motor Stirling ideal depende só das temperaturas do aquecedor T_H e a temperatura de resfriamento T_L ; ou seja, que o ciclo do motor Stirling pode atingir sua máxima eficiência seguindo o ciclo de Carnot (Enríquez e Guadalupe, 2011).

5.9.5 Projeto dos motores Stirling

Os motores térmicos são normalmente projetados para operar num ponto intermediário de dois casos especiais, buscando um equilíbrio entre dois limites: eficiência máxima possível e potência máxima. O primeiro caso limite é a eficiência de Carnot de um motor que é completamente reversível e que representa a máxima eficiência possível. A eficiência de Carnot completa reversível é dada por (Bancha e Somchai, 2005):

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (5-46)$$

Onde:

T_L = Temperatura do trocador frio do motor Stirling

T_H = Temperatura do trocador quente do motor Stirling

O segundo caso limite é o desempenho do motor térmico Endo-reversível seguem Curzon-Ahlborn, que representa a eficiência na operação da potência máxima (Bancha e Somchai, 2005). O desempenho Curzon e Ahlborn é dado pela equação:

$$\eta_{\text{Curzon-Ahlborn}} = 1 - \sqrt{\frac{T_C}{T_H}} \quad (5-47)$$

A eficiência nos motores de tipo endo-reversível- Carnot é menor que a de um motor de Carnot completamente reversível, no entanto a potência obtida nos dois motores é similar. A eficiência de um tipo de motor Endo-reversível-Carnot é dada por (Bancha e Somchai, 2005):

$$\eta_{\text{Endoreversível}} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad (5-48)$$

Onde:

T_1 : Temperatura do fluido de trabalho no trocador frio

T_3 : Temperatura do fluido de trabalho no trocador quente

5.10 MOTOR STIRLING SOLAR

A característica do motor Stirling é de ser de combustão externa, que possibilita a utilização de diversos combustíveis, pois necessita apenas uma fonte de alta temperatura, sendo possível o uso de energia solar como fonte de calor. Pode ser utilizado para produzir energia mecânica ou produzir eletricidade através de um gerador (Bergermann e GbR, 2001). A eficiência do sistema Stirling solar é dada por (Bancha e Somchai, 2005):

$$\eta = \eta_c * \eta_E \quad (5-49)$$

η_c : Eficiência do Concentrador

η_E : Eficiência do motor Stirling

Assumindo que a concentração geométrica depende das propriedades dos materiais de fabricação, esta pode ser calculada da seguinte maneira (Bancha e Somchai, 2005):

$$C_{\text{max,real}} = \frac{A_{\text{abertura}}}{A_{\text{receptor}}} \alpha_{\text{abs}} \rho \quad (5-50)$$

Isolando a área de abertura

$$A_{abertura} = \frac{C_{max,real} * A_{receptor}}{\alpha_{abs}\rho} \quad (5-51)$$

Transformando a equação (5-26) em função da área da abertura do coletor fica:

$$\eta_c = \frac{G_b * A_{rec} * C_{max,real} - \sigma \epsilon A_{rec} * (T_{rec}^4 - T_{amb}^4) - h_c A_{receptor} (T_{rec} - T_{amb})}{\frac{C_{max,real} * A_{receptor}}{\alpha_{abs}\rho} * G_b} \quad (5-52)$$

Agrupando termos:

$$\eta_c = \alpha_{abs}\rho - \frac{\sigma \epsilon * \alpha_{abs}\rho * (T_{rec}^4 - T_{amb}^4)}{C_{max,real} G_b} - \frac{h_c * \alpha_{abs}\rho * (T_{rec} - T_{amb})}{C_{max,real} G_b} \quad (5-53)$$

Representado em termos de K_1 e K_2

$$\eta_c = \alpha_{abs}\rho - K_1 \alpha_{abs}\rho (T_H^4 - 9.2845 \times 10^6 T_A^6) - K_2 \alpha_{abs}\rho (T_H - T_A) \quad (5-54)$$

Onde:

$$K_1 = \epsilon \sigma / G_b C \quad (5-55)$$

$$K_2 = h_c / G_b C \quad (5-56)$$

Assim a equação:

$$\eta_c = [\alpha_{abs}\rho - K_1 \alpha_{abs}\rho (T_{rec}^4 - 9.2845 \times 10^6 T_{amb}^6) - K_2 \alpha_{abs}\rho (T_{rec} - T_{amb})] \eta_E \quad (5-57)$$

A equação (5-56) é a expressão geral para a determinação do valor da temperatura ótima para condição de máxima eficiência possível e uma máxima potência possível no motor Stirling.

5.10.1 Condição de máxima eficiência de acordo com a metodologia Carnot

Para encontrar a temperatura ideal para a condição de máxima eficiência, substitui-se na equação (5-46) a eficiência de Carnot pela equação (5-57):

Substituindo na equação (5-57):

$$\eta = \eta_c \eta_{carnot} = [\alpha_{abs} \rho - K_1 \alpha_{abs} \rho (T_{rec}^4 - 9.2845 \times 10^6 T_{amb}^6) - K_2 \alpha_{abs} \rho (T_{rec} - T_{amb})] \left[1 - \frac{T_c}{T_{rec}} \right] \quad (5-58)$$

Deve notar-se que a eficiência de Carnot é significativamente maior do que a eficiência real do motor Stirling; portanto, a eficiência global do sistema Dish/Stirling foi calculada com base na eficiência de Carnot, como se mostra na equação (5-58) (Banca e Somchai, 2005).

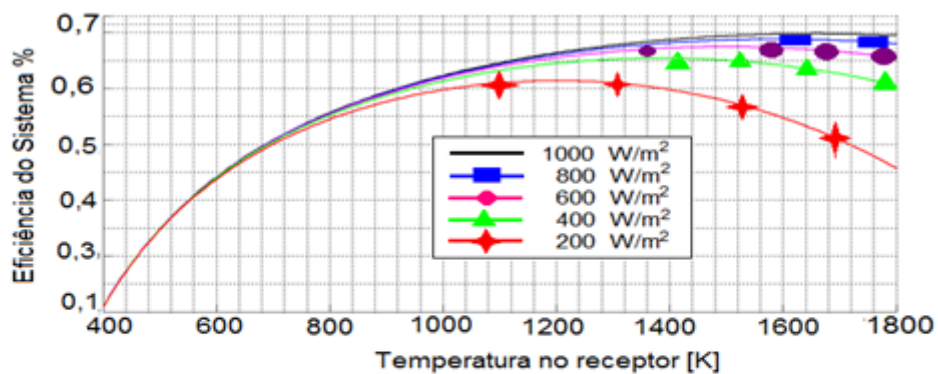
Para determinar a máxima eficiência global do sistema Dish/Stirling, deriva-se a equação (5.58) com relação à temperatura no receptor e iguala-se a zero.

$$\frac{d\eta}{dT_{rec}} = 0 \quad (5-59)$$

A temperatura ideal do absorvedor T_{rec}^* é obtida a partir da solução da equação (5-59):

$$T_{rec}^{*5} - 0,75 T_c T_{rec}^{*4} + 0,25 \frac{K_2}{K_1} T_{rec}^{*5} - 0,25 \left[9,2845 \times 10^{-6} T_{amb}^6 + \frac{K_2}{K_1} T_{amb} + \frac{1}{K_1} \right] T_c = 0 \quad (5-60)$$

A figura 5.17, mostra a representação da equação (5-60) em curvas de perfil, onde a análise foi realizada para 5 valores de irradiância (200, 400, 600, 800, 1000 W/m²), mantendo constante a concentração solar em 2500 soles, para um coletor de 7,3 m de diâmetro, onde mostram-se os valores de temperaturas ótimas em que os sistemas operam a máxima eficiência resultante.



I_b	200	400	600	800	1000
T_{max}	1147	1321	1433	1518	1587
η_{max}	0,57	0,60	0,63	0,65	0,66

Figura 5.17 Máxima eficiência possível para diferentes níveis de irradiação solar

Porém o aumento da temperatura tem um limite, porque depois do ponto de inflexão da curva, com o aumento de temperatura a eficiência começa a diminuir, isto devido a um aumento das perdas por convecção, radiação e das propriedades dos materiais (Sánchez S, 2003).

5.10.2 Condição de máxima potência de acordo com a metodologia Curzon-Ahlborn.

Curzon e Ahlborn foram os primeiros em desenvolver a equação para a determinação da eficiência de um motor de tipo Endo-reversível- Carnot sob a condição de potência máxima possível. Calculou-se a eficiência pela metodologia de Curzon e Ahlborn usando a equação (5-47) (Bancha e Somchai, 2005). O desempenho Curzon-Ahlborn não representa o limite superior da eficiência real do motor térmico, representa apenas a eficiência real de um motor térmico sob a condição de obter a máxima potência possível (Delfino, 2007).

Para encontrar a condição de máxima potência, foi utilizada a equação (5-61)

$$\eta_{max,potencia} = \eta_c \eta_{curzon-Ahlborn} \quad (5-61)$$

Para um motor Stirling real, o cálculo da eficiência do motor pode ser realizado a partir da fórmula Malmo (Bancha e Somchai, 2005).

$$\eta_{IT} = k_S \left(1 - \frac{T_c}{T_{rec}} \right) \quad (5-62)$$

Onde k_S é o coeficiente de Stirling, e é a proporção de máxima eficiência que pode ser obtida com a tecnologia atual. Os valores de k_S estão entre 0,55 e 0,88 (Bancha e Somchai, 2005).

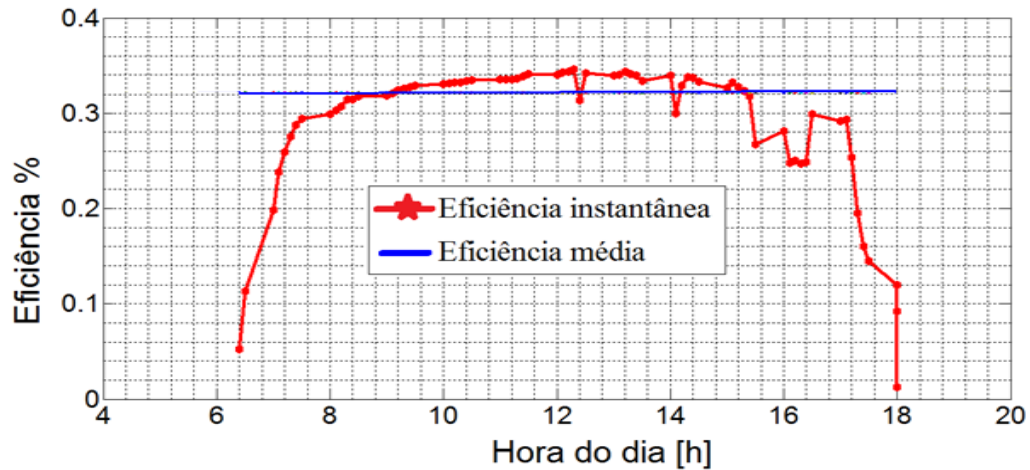


Figura 5.18 Eficiência do motor Stirling para um valor de $K_s = 0,55$

A figura 5.18, apresenta a eficiência do motor Stirling para um valor de $k_s = 0,55$ para o dia 15/04/2010, com um valor máximo de 34,5%, tendo em conta a variação da temperatura ambiente e a temperatura na fonte quente do motor de 740 °C.

Então:

$$\eta_{max,pot} = [\alpha\rho - K_1\alpha\rho(T_{rec}^4 - 9,2845 \times 10^{-6}T_{amb}^6) - K_2\alpha\rho(T_{rec} - T_{amb})] \left[1 - \left(\frac{T_c}{T_{rec}} \right)^{0,5} \right] \quad (5-63)$$

Seguindo o mesmo procedimento que o de máxima eficiência possível, a temperatura ideal do absorvedor para a condição máxima potência é dada pela seguinte equação:

$$T_{rec}^{*9/2} - 0,875T_c^{0,5}T_{rec}^{*4} + 0,25\frac{K_2}{K_1}T_{rec}^{*3/2} - 0,125\frac{K_2}{K_1}T_c^{0,5}T_{rec}^{*} - 0,125 \left[9,2845 \times 10^{-6}T_{amb}^6 + \frac{K_2}{K_1}T_{amb} + \frac{1}{K_1} \right] T_c^{0,5} = 0 \quad (5-64)$$

Para a condição ideal de potência máxima a temperatura no receptor deve aumentar, porém o desempenho cai drasticamente como é mostrado na figura 5.19. Nesta condição o motor funciona em períodos curtos de tempo, devido às grandes exigências ou esforços que sofre.

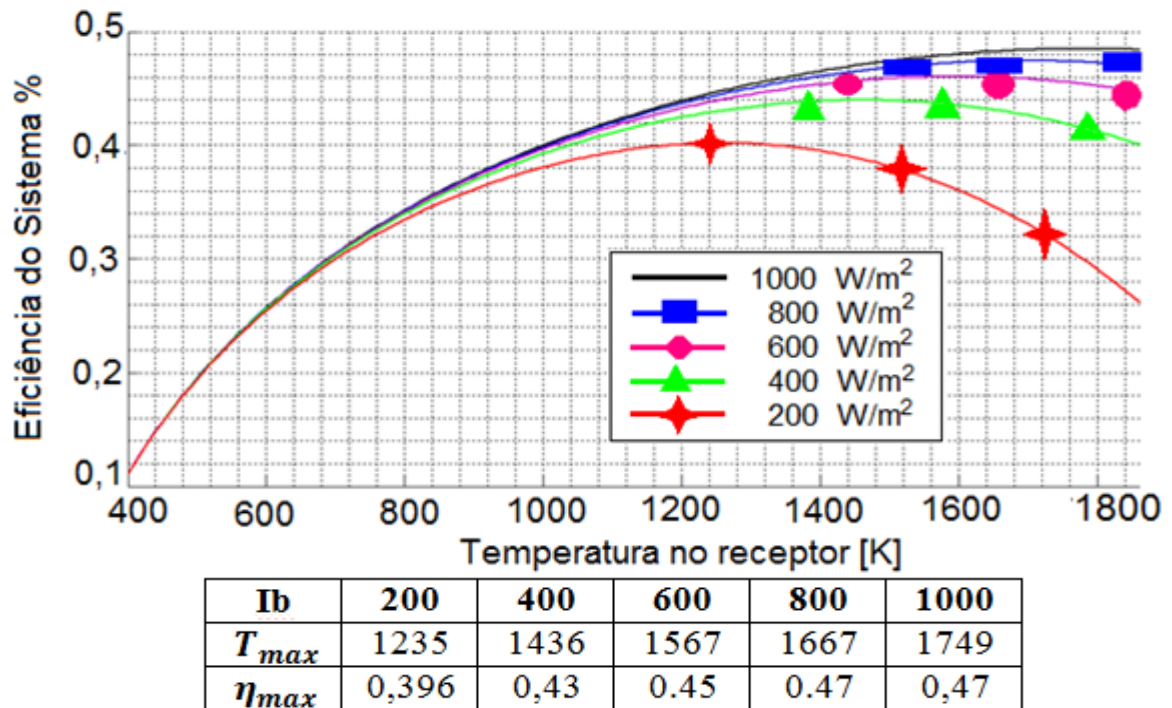


Figura 5.19 Máxima potência possível para diferentes níveis de irradiação solar

5.11 EFICIÊNCIA GLOBAL DO SISTEMA

Calculada a temperatura ideal do absorvedor obtida na condição de máxima eficiência possível, é calculada a eficiência geral do sistema, tendo em conta o fator k_S . A eficiência geral do sistema (Dish/Stirling) é calculada tendo em conta as seguintes eficiências:

$$\eta_{sistema} = \eta_{colector} * \eta_{receptor} * \eta_{motor} * \eta_{generator} \quad (5-65)$$

Substituindo na equação (5.62)

$$\eta_{sistema} = \left[\alpha_{abs} \rho - K_1 \alpha_{abs} \rho (T_{rec}^4 - 9.2845 \times 10^6 T_{amb}^6) - K_2 \alpha_{abs} \rho (T_{rec} - T_{amb}) \right] * k_S \left(1 - \frac{T_c}{T_{rec}} \right) * f_s (\cos \theta_i) \rho \phi * \eta_{gerador} \quad (5-66)$$

A figura 5.20, mostra a eficiência do sistema geral utilizando as metodologias propostas na tabela 5.1; é assumida a eficiência do gerador de 94 %. O comportamento da eficiência do sistema para o dia (15/04/2010) para as três metodologias varia entre 22,9% e 24%.

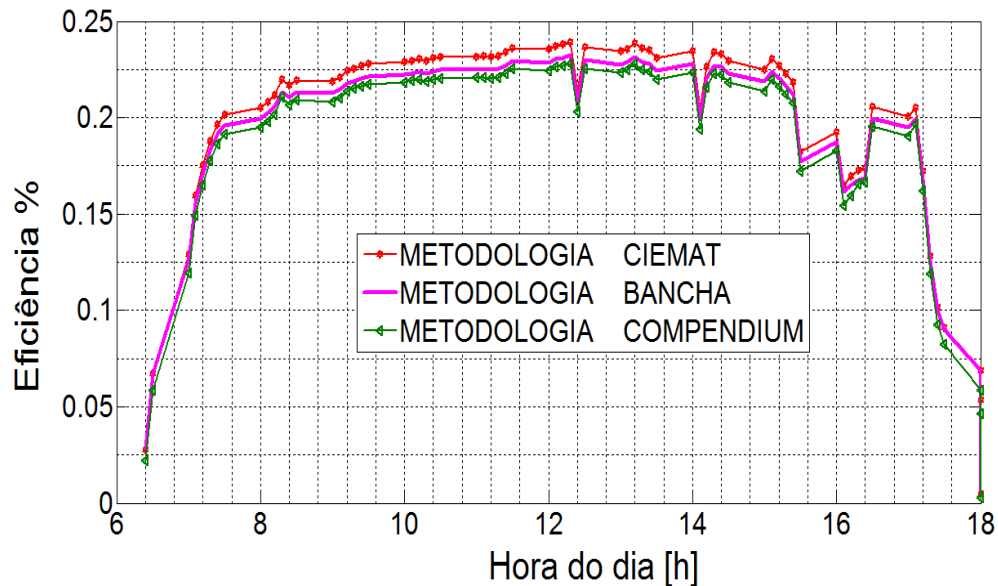
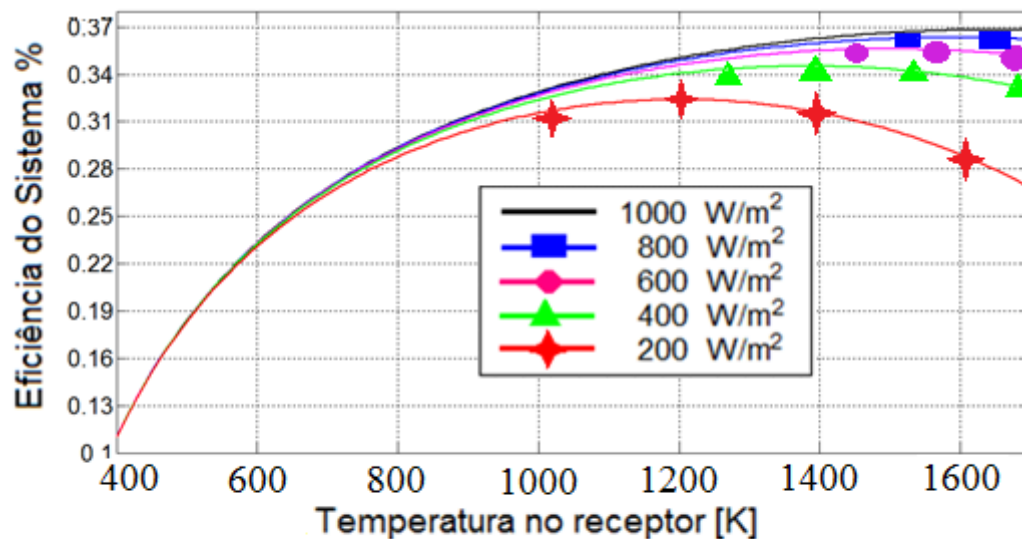


Figura 5.20 Comparação da variação da eficiência global utilizando três metodologias, para as condições de insolação típica da cidade de Itajubá no dia 15/04/2010.

O cálculo da eficiência total do sistema, mostrado nas curvas da figura 5.21, foi calculado a partir da eficiência para condição de máxima eficiência do sistema tendo em conta a metodologia de MALMO. As curvas representam qual é a temperatura ótima do absorvedor para que o sistema atinja a máxima eficiência.



I_b	200	400	600	800	1000
T_{max}	1190	1403	1498	1604	1692
η_{max}	0,30	0,32	0,34	0,36	0,37

Figura 5.21 Eficiência máxima possível para condições ótimas no sistema

5.12 POTÊNCIA ELÉTRICA

A potência elétrica do sistema varia de acordo com as condições climáticas (Temperatura ambiente, irradiação solar e velocidade do vento). A potência elétrica é calculada da seguinte forma:

$$P_{Eletrica} = \eta_{sistema} * A_{coletor} * G_b [W] \quad (5-67)$$

A figura 5.22 mostra uma predição da potência gerada para condições do dia (15/04/2010), onde se observa que atinge uma potência máxima de 30 kW_e, este comportamento é devido à variação da irradiação solar durante o dia (12h: 35min P.m.).

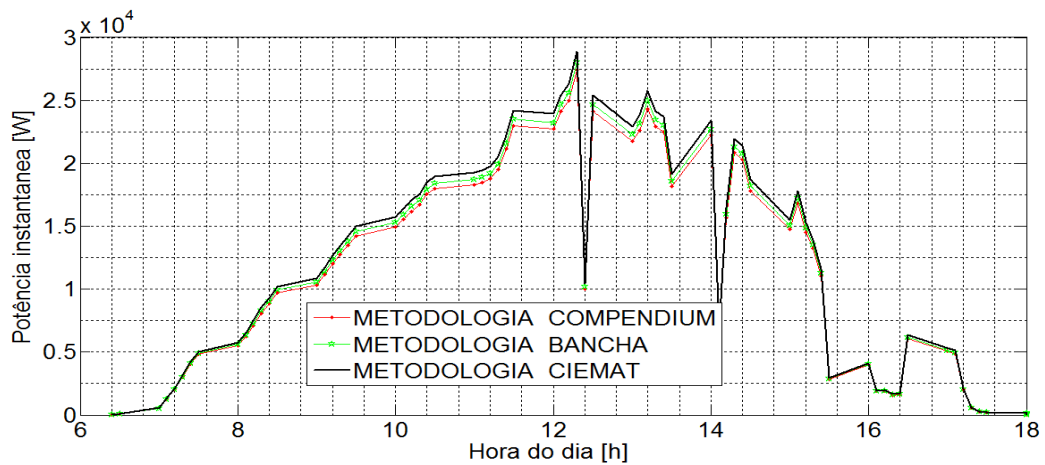


Figura 5.22 Comparação da variação na potência elétrica gerada pelo sistema Dish/Stirling utilizando três metodologias, para as condições de insolação típica da cidade de Itajubá no dia 15/04/2010.

Capítulo 6.

VALIDAÇÃO DO MODELO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 MODELO MATEMÁTICO

Existem vários tipos de modelos, mas geralmente quando se tratam de estudar os fenômenos naturais como a radiação solar, é utilizada modelos matemáticos como: Estocástico ou determinísticos, estáticos dinâmicos, etc. Um modelo matemático é a expressão formal em linguagem matemática das relações entre os componentes de um modelo (Moore *et al.*, 1993). A construção de um modelo matemático envolve a seleção e quantificação dos componentes, variáveis e relações presentes no sistema para representar com um nível de detalhe requerido (Alonso S., 2004). A figura 6.1 mostra o modelo matemático utilizado neste trabalho, definido da seguinte maneira:

- Estática: Porque são considerados parâmetros médios para intervalos de tempo, por exemplo, os valores considerados foram: irradiação solar média de 1000 W/m², temperatura ambiente média de 30 °C e velocidade do vento 0,5 Km/h; e dando um resultado dentro de um período de tempo. Estes valores foram considerados para a validação do modelo.
- Dinâmica: Porque consideram o comportamento das variáveis ao longo do tempo. Neste caso têm valores de irradiação solar, temperatura ambiente, velocidade do vento para a cidade de Itajubá, tomadas a cada 10 minutos durante 24 horas por dia. Servindo como um objeto de estudo para a geração de eletricidade e para determinar o comportamento do sistema para cada instante do dia.

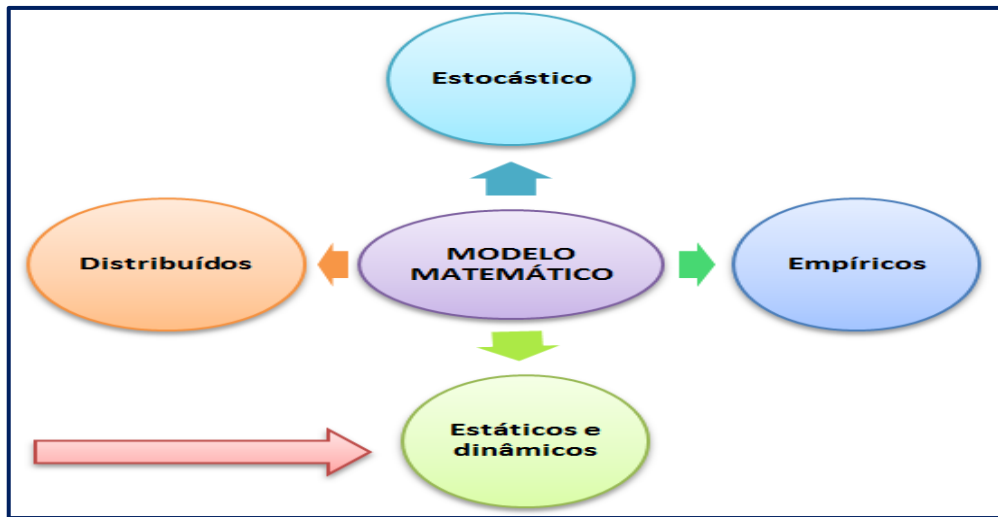


Figura 6.1 Metodologias propostas para o trabalho

O esquema geral do comportamento de um sistema é mostrado na figura 6.2, onde são explicadas algumas definições das características estruturais do modelo como:

- ✓ **Entradas:** As entradas representam o elemento ou material que vai ser consumido ou transformado num processo da conversão de energia solar em energia elétrica. Para este trabalho as entradas ao sistema são o fluxo de energia solar, a velocidade do vento e a temperatura ambiente.
- ✓ **Saídas:** As saídas representam a informação produzida pelo processo, função ou atividade realizada dentro do sistema.
- ✓ **Variáveis de estado:** Correspondem à quantidade de matéria ou energia armazenada em cada um dos componentes (subsistemas) que formam parte do sistema.
- ✓ **Parâmetros:** São variáveis que não mudam ao longo do período de simulação, neste trabalho se deixam fixos os seguintes parâmetros: refletividade, absorvidade, emissividade, fator de sombreamento, alguns configurações geométricas, etc.
- ✓ **Constantes:** São magnitudes físicas que não variam em nenhum caso (Constante solar, constante de Stefan Boltzman, etc.).

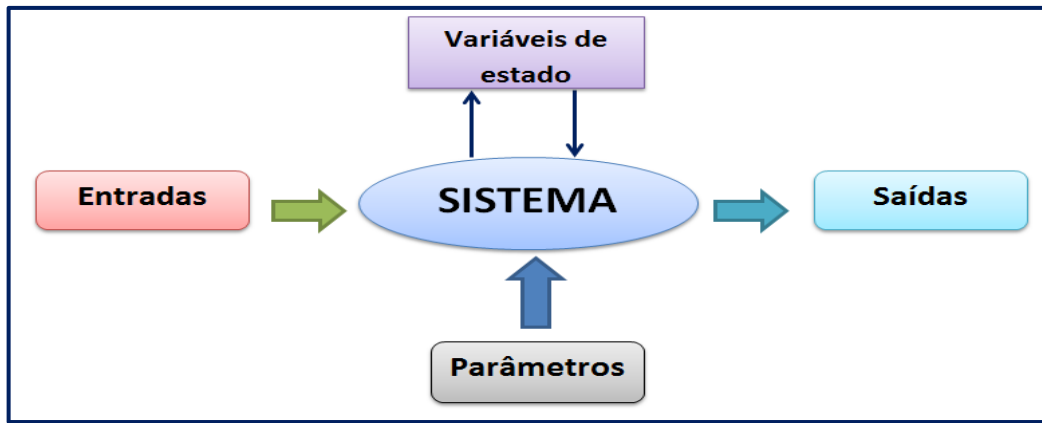


Figura 6.2 Modelo do processo (Alonso S., 2004)

6.1.1 Etapas da modelagem

As equações que representam os modelos matemáticos estabelecem de maneira explícita as influências que têm alguns parâmetros (mudanças climáticas, fatores geométricos, comportamentos térmicos, etc.) sobre outros (Alonso S., 2004). Para isto é necessário conhecer o processo para identificar e estruturar as etapas do sistema de geração e elaborar o modelo matemático. As etapas na definição de um modelo matemático são mostradas na figura 6.3 e estão definidas da seguinte maneira (Alonso S., 2004):

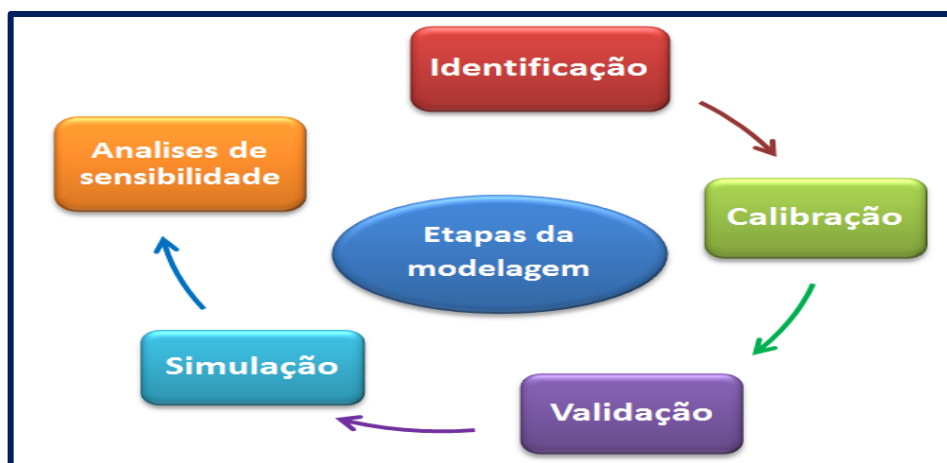


Figura 6.3 Etapas da modelagem

- **Identificação:** É a determinação dos componentes e as relações das equações matemáticas $f(X)$ que representam o modelo.

- **Calibração:** É a determinação dos valores dos parâmetros; através da medição no campo ou estimando-o mediante algum modelo empírico.
- **Validação:** É a obtenção das variáveis de estado e a saída num tempo passado para sua comparação com valores reais das mesmas. O objetivo é encontrar o erro e determinar se é aceitável.
- **Simulação:** Resultados dados por um algoritmo matemático a partir de dados de entrada
- **Análises de sensibilidade:** Resultados dados pelo algoritmo matemático, alterando os parâmetros para determinar a influência de cada um deles nos resultados do modelo.

6.1.2 Construção do modelo geral

O modelo é traduzido numa linguagem de programação, é importante ter em conta que o código gerado funcione corretamente. O modelo elaborado será chamado modelo NEST com o fim de diferenciá-lo de outros modelos. A construção do modelo supõe nas seguintes etapas, mostradas na figura 6.4:

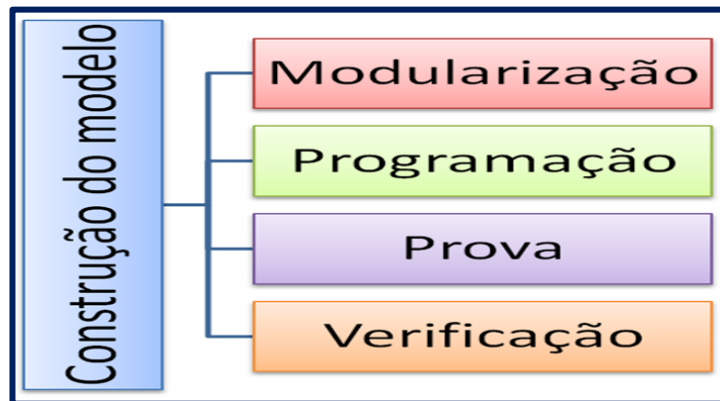


Figura 6.4 Etapas da construção do modelo matemático

- ✓ **Modularização:** Decompõe o conjunto de equações que constituem o modelo em porções de código para gerar funções pequenas que realizem tarefas concretas. As interações entre todas as funções constituem o programa (Alonso S., 2004).

- ✓ **Programação:** As diferentes equações são combinadas utilizando diferentes estruturas de controle que as linguagens de programação proporcionam para a execução do modelo (Alonso S., 2004).
- ✓ **Prova:** Cada módulo por separado e suas integrações devem ser provadas, para verificar que se executam corretamente e não tenham mensagens de erro (Alonso S., 2004).
- ✓ **Verificação:** Compara e valida com outros resultados da bibliografia especializada.

6.2 METODOLOGIA APLICADA

O modelo matemático desenvolvido para a geração de eletricidade a partir da irradiação solar usando o sistema Dish/Stirling para as condições climatológicas da cidade de Itajubá em M.G Brasil, foi elaborado de acordo com um algoritmo sequencial. O algoritmo de solução foi feito utilizando loops condicionais para limitar a concentração máxima e também foram utilizados procedimentos iterativos para encontrar a temperatura ideal na superfície do receptor, além de elaborar curvas que permitem selecionar os parâmetros de projeto e de configuração geométrica. Como suporte para o diagrama do algoritmo de solução foram utilizados os fundamentos básicos da física como a ótica geométrica (espelhos e lentes) e leis físicas como as de reflexão e refração. Também foram utilizados os fundamentos da transferência de calor (Convecção e Radiação).

O primeiro passo foi aplicar um método analítico, mostrado na figura 6.5; que estrutura o processo de conversão de energia solar em elétrica em várias etapas, onde para cada etapa foi realizado um submodelo matemático. O quadro (A) representa a descrição do comportamento do movimento do sol na cidade de Itajubá, isto é importante porque é preciso determinar os ângulos necessários que permitam fazer um seguimento solar perfeito além de encontrar o tempo de insolação para cada dia do ano. O quadro (B) representa as variações que podem ter a geometria do Coletor/Receptor e como influem no desempenho final do sistema. O quadro (C) representa o balanço térmico, determinando quais são os parâmetros que influem na energia útil acumulada dentro da cavidade do receptor. Os três quadros (A, B e C) identificam quais são os parâmetros e as variáveis que afetam o comportamento térmico do sistema.

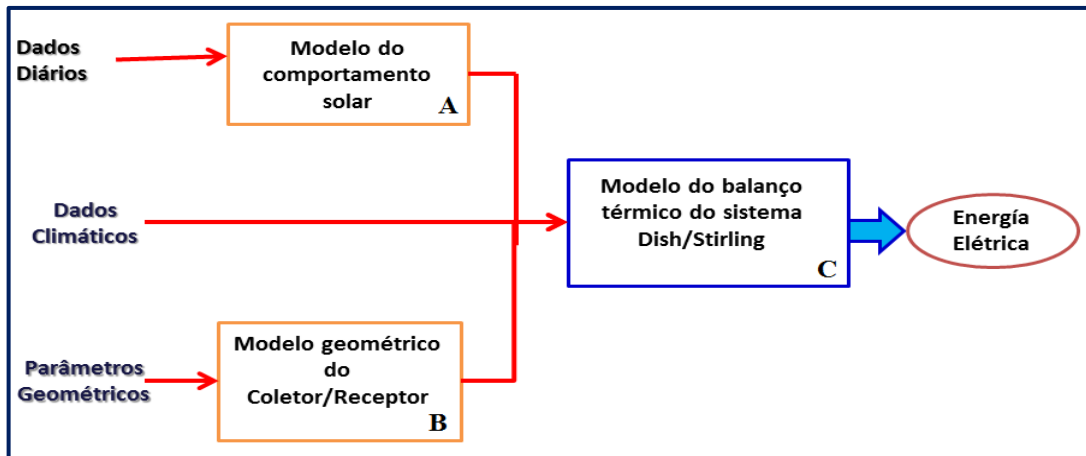


Figura 6.5 Metodologia analítica do modelo

A figura 6.6, mostra o sistema de geração de energia elétrica Dish/Stirling, melhor detalhado em várias etapas. Neste esquema são consideradas as variáveis que afetam as eficiências do sistema para cada etapa, identificando as equações que descrevem o comportamento do sistema para desenvolver o algoritmo sequencial.

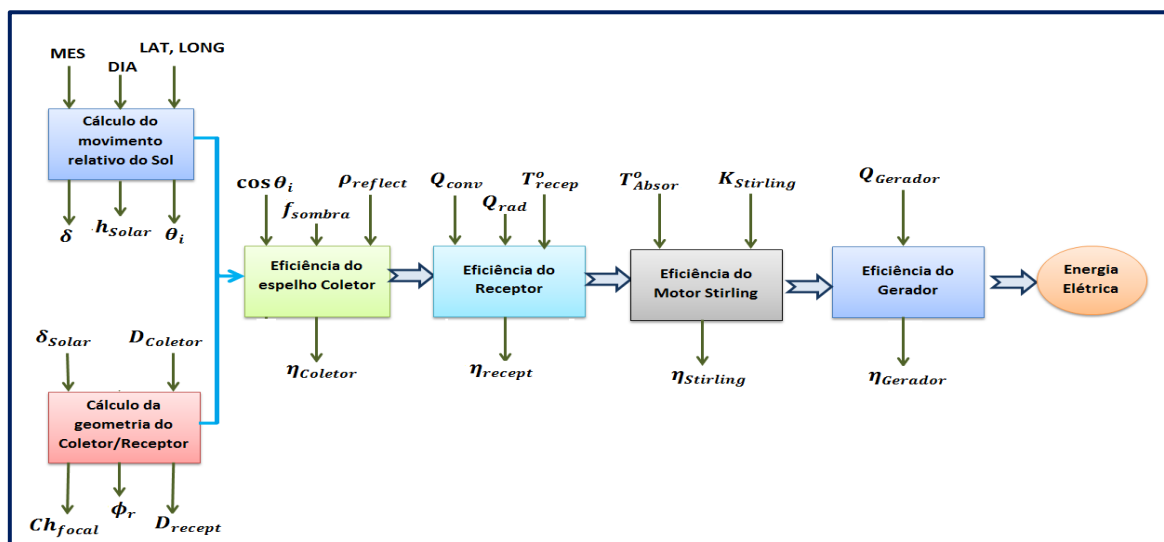


Figura 6.6 Fluxo de energia no sistema Dish/Stirling

O quadro (D) representa a luz refletida pelo coletor ao ponto focal, nesta etapa as principais causas de redução da energia são produzidas pela capacidade de refletir a luz solar num ponto fixo chamado foco e também pela sombra produzida pela estrutura que sustenta o receptor. O parâmetro a calcular nesta etapa é a eficiência do concentrador que depende das características óticas do espelho e rastreamento solar. No quadro (E), o parâmetro a calcular é a eficiência do receptor, ali nem toda a energia que entra na cavidade do absorvedor é aproveitada, já que grande parte da energia é rejeitada ao ambiente, resultando nas perdas por convecção e radiação. O quadro (F) apresenta como fluxo de entrada a energia térmica que é

transformada em energia mecânica pelo motor Stirling, onde as maiores perdas são produzidas devidas á necessidade de se refrigerar o motor e evacuar o calor residual não aproveitado pelo ciclo Stirling fechado, isto é devido às altas temperaturas que atingem o receptor. Finalmente no quadro (C), o gerador transforma a quantidade de energia mecânica em energia elétrica dissipando o resto da energia ao ambiente.

O segundo método aplicado foi a metodologia numérica, utilizando um algoritmo de solução com procedimentos tanto iterativos como sequenciais. A primeira fase do algoritmo é mostrada na Figura 6.7. O cálculo das razões trigonométricas do movimento relativo do sol em relação ao coletor tem em conta parâmetros de entrada tais como a latitude, longitude, ano, hora local, etc., que permitiram determinar os ângulos que regem o seguimento perfeito do sol como ângulo azimute, o ângulo de elevação solar, ângulo horário, ângulo de incidência, etc., além estimar o tempo de insolação durante o dia.

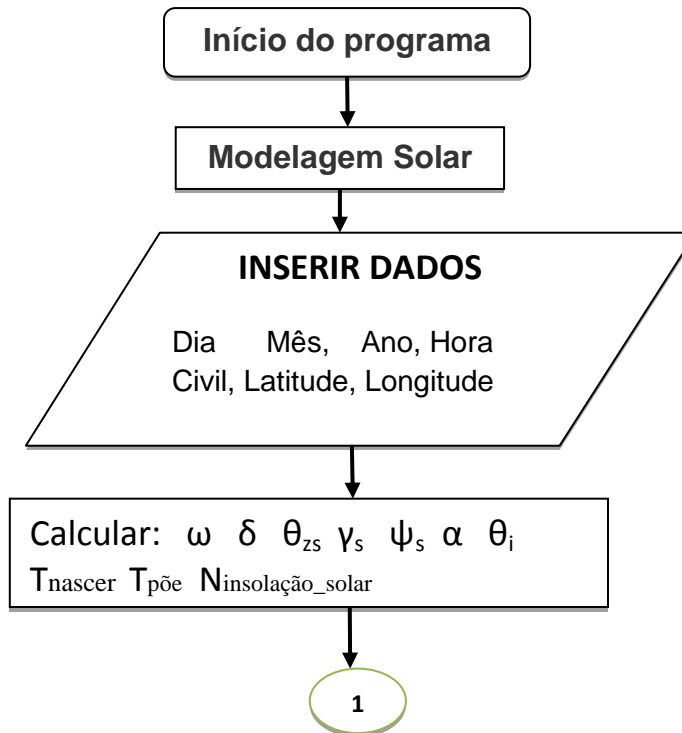


Figura 6.7 Algoritmo de solução do modelo do movimento relativo do Sol

A segunda etapa do algoritmo mostrado na figura 6.8, calcula os parâmetros do projeto geométrico e do dimensionamento do Coletor/Receptor: distância focal ótima, fator de forma geométrica, fator de sombreamento, concentração máxima geométrica, etc., a fim de maximizar a concentração do fluxo de calor no interior da cavidade do receptor. Os valores de concentração do sistema Dish/Stirling, foram limitados a partir de dados encontrados na literatura científica, já que geometricamente os valores podem atingir até 46.189 soles (Pitz, 2007).

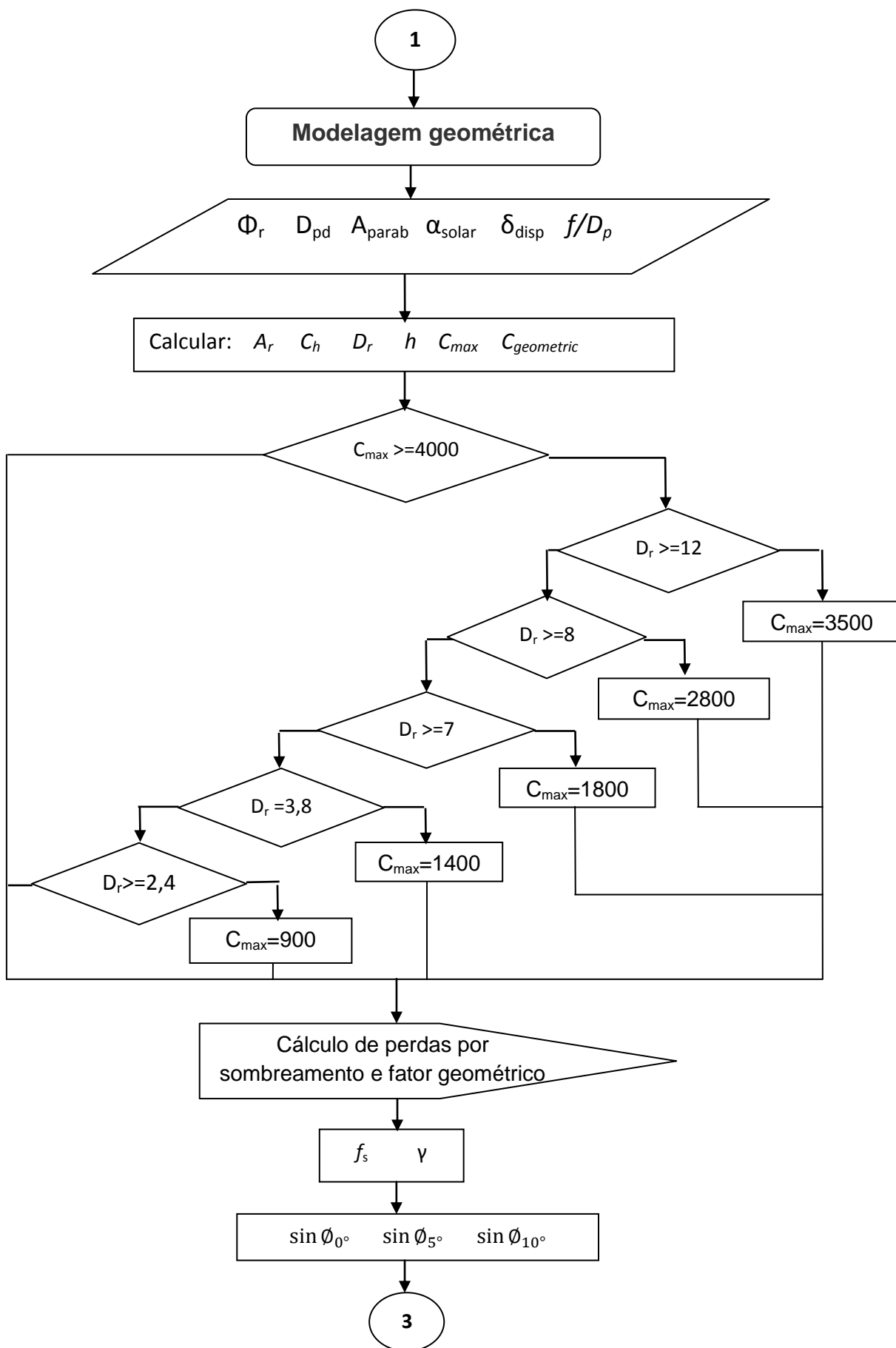


Figura 6.8 Algoritmo de solução do modelo geométrico e dimensionamento do coletor

A terceira fase do algoritmo é mostrada na figura 6.9, onde mostra a sequência do cálculo do balanço térmico para a fase entre o receptor e o motor Stirling, que têm parâmetros de entrada como o coeficiente de absorção, coeficiente de reflexão, etc. O algoritmo inclui o cálculo dos parâmetros principais que afetam o comportamento térmico, tais como o fluxo de energia que atinge a cavidade do receptor, as perdas por convecção e radiação, a temperatura teórica para o receptor e as eficiências para cada fase do sistema (capacidade de reflexão do espelho coletor, capacidade de absorção e transmissão no receptor para o motor Stirling e eficiência global da tecnologia Dish/Stirling).

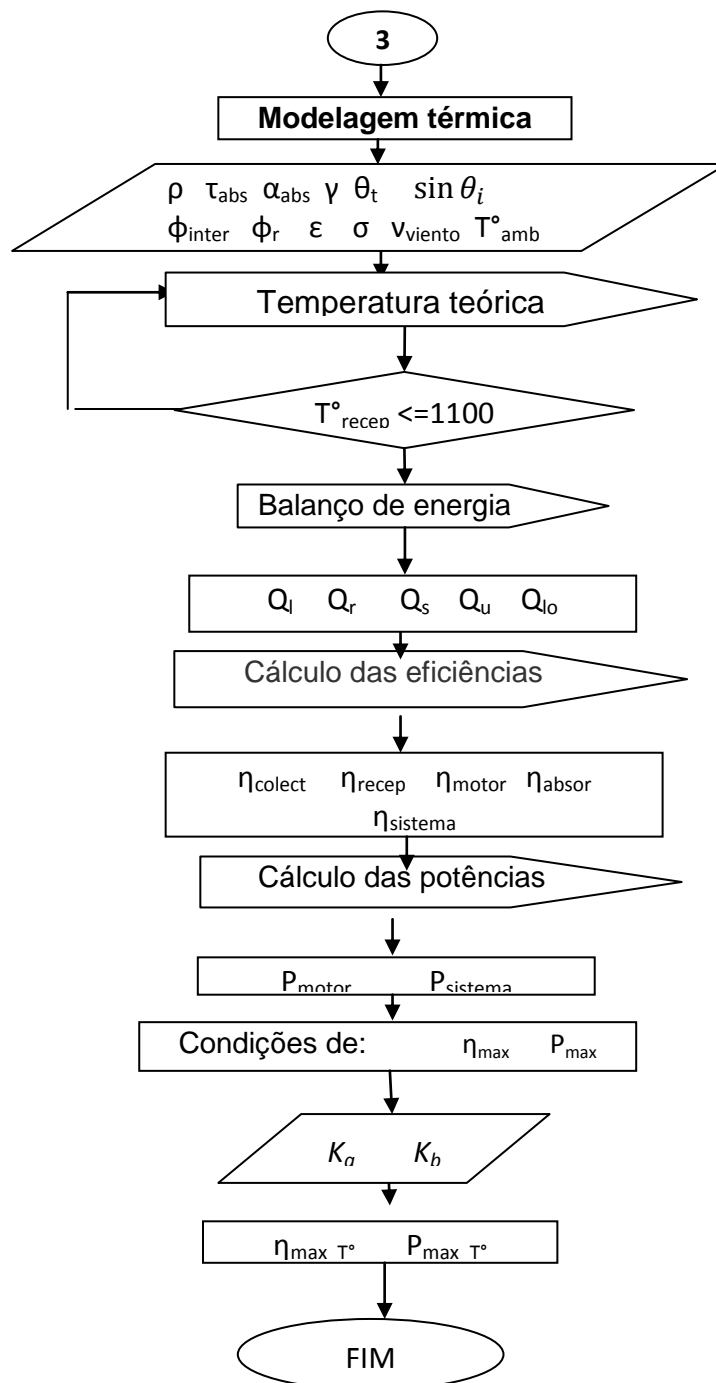


Figura 6.9 Algoritmo de solução do Balanço de energia

6.3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

A validação do modelo é realizada em duas partes. A primeira parte consta na validação do modelo solar que descreve o movimento relativo do sol na cidade de Itajubá-MG, Brasil. Os resultados são comparados com o programa “Sunrise” encontrado na Internet. Este programa está configurado para posições geográficas fixas ao redor do mundo. A validação do modelo térmico é realizada através da comparação dos resultados obtidos fornecidos no Compendium Solar.

6.3.1 Validação do modelo do movimento relativo solar para a cidade de Itajubá

Uma vez exposta à teoria para a geometria do comportamento solar durante o ano, foi desenvolvido um programa de simulação com a finalidade de determinar os ângulos de seguimento do sol e o tempo solar verdadeiro durante o dia. Para que os resultados deste trabalho possam ser utilizados, é necessária a validação do programa a partir de um modelo de referência. O programa “Sunrise” desenvolvido por Hoff et al., (2004) e encontrado na internet, permitiu a validação do modelo de movimento relativo solar, mostrando o comportamento dos ângulos que descrevem o movimento relativo do sol, para diferentes localizações geográficas do mundo mostradas na tabela 6.1.

O ângulo de incidência serve como uma comparação para validar o modelo, já que este ângulo depende dos outros ângulos para ser calculado. A figura 6.10 mostra a comparação (Sunrise-Nest) da variação do ângulo de incidência na cidade do Rio de Janeiro, o dia 13 de junho do ano 2011, com uma porcentagem de erro menor de 0,34% com relação ao Sunrise.

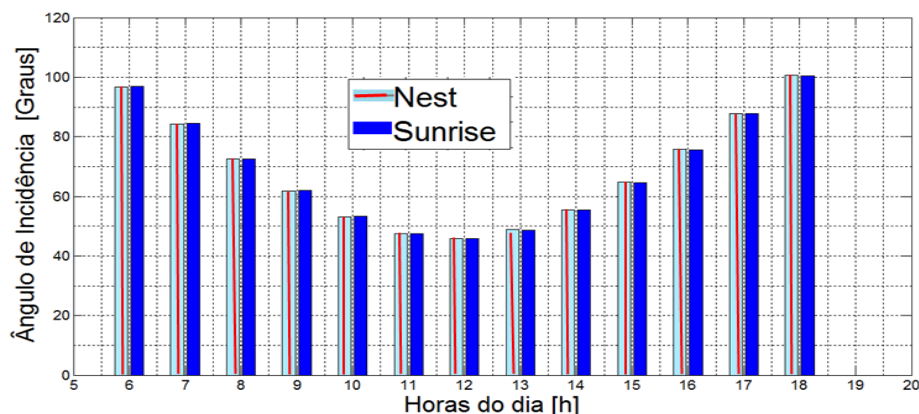


Figura 6.10 Variação do ângulo de incidência

Nas tabelas 6.1 e 6.2 mostram os parâmetros de entrada definidos para diferentes localizações no planeta (Latitude, longitude), ademais de indicar a hora civil, dia, mês e ano. Estes parâmetros determinam os ângulos do movimento do sol para cada instante do dia. As comparações destes dados foram feitas para algumas cidades do mundo, com o efeito de validar o programa elaborado em MATLAB.

Tabela 6.1 Validação de o modelo Solar (NEST-SUNRISE)

LOCALIZAÇÃO	São Salvador/o Salvador (SUNRISE)	São Salvador/o Salvador (NEST)	Rio de janeiro/Brasil (SUNRISE)	Rio de janeiro/Brasil (NEST)	Lima/Peru (SUNRISE)	Lima/Peru (NEST)
Dados de entrada						
Longitude	-89,12°/-89 ⁰ 7,2'	-89,12°/-89 ⁰ 7,2'	-43,12°/-43 ⁰ 7,2'	-43,12°/-43 ⁰ 7,2'	-77,03°/-77° 1,8'	-77,03°/-77° 1,8'
Latitude	13,42°/13 ⁰ 25,2'	13,42°/13 ⁰ 25,2'	-22,54°/-22 ⁰ 32,4'	-22,54°/-22 ⁰ 32,4'	-12,03° / - 12° 1,8'	-12,03° / - 12° 1,8'
Dia	13	13	13	13	13	13
Mês	2	2	6	6	6	6
Hora Civil	14h:16 min	14h:16 min	12 h:16min	12 h:16min	9 h : 20 min	9 h : 20 min
Dados de saída						
Verão o inverno	-	-	-	-	-	-
Hora Solar	14 h: 05 min	14 h: 06 min	12 h: 23min	12 h: 24 min	9 h: 12 min	9 h: 12 min
Equação do tempo	-14,26 min	-14,26 min	0,3981min	0,3981 min	0,3981 min	0,3981 min
Declinação	-13,94°	-13,946°	23,213°	23,213°	23,213°	23,213°
Efeito dos minutos	-	4,480 min	-	8,480 min	-	-
Altura solar	48,639°	48,461°	43,877°	43,847°	35,913°	35,913°
Ângulo horário	31,314°	31,555°	5,9795°	6,219°	-41,93°	-41,93°
Ângulo Azimutal	49,760°	49,986°	172,36°	172,064°	-130,6°	-130,68°
Ângulo de incidência	41,360°	41,539°	46,122°	46,152°	54,086°	54,087°
Saída Solar	6 h: 24 min	6 h: 13 min	6 h: 33 min	6 h: 41 min	6 h: 28 min	6 h: 20 min
Pôr do Sol	17 h: 57 min	17 h: 46 min	17 h: 11min	17 h: 18min	17 h: 46	17 h: 39 min
Duração do dia	11 h: 32 min	11 h: 32 min	10 h: 37min	10 h: 37min	11 h: 18	11 h: 18 min

Tabela 6.2 Validação de o modelo Solar (NEST-SUNRISE)

LOCALIZAÇÃO	Londres/ Inglaterra (SUNRISE)	Londres/ Inglaterra (NEST)	Sydney / Austrália (SUNRISE)	Sydney / Austrália (NEST)	Paris / Francia (SUNRISE)	Paris / Francia (NEST)
Dados de entrada						
Longitude	-0,10°/-0° 6'	-0,10°/-0° 6'	151,13°/151° 7,8'	151,13°/151° 7,8'	2,20°/2° 12'	2,20°/2° 12'
Latitude	51,30°/51° 18'	51,30°/51° 18'	-33,52°/-33° 31,2'	-33,52°/-33° 31,2'	48.52°/48° 31,2	48.52°/48° 31,2
Dia	13	13	13	13	13	13
Mês	9	9	10	10	3	3
Hora Civil	14h: 16 min	14h: 16 min	12 h: 16min	12 h: 16min	9 h: 20 min	9 h: 20 min
Dados de saída						
Verão o inverno	-	-	-	-	-	-
Hora Solar	14 h: 19 min	14h: 20 min	12 h: 34 min	12h: 25 min	8 h 18 min	8 h: 08 min
Equação do tempo	4,267 min	4,267 min	14,188 min	14,188 min	-9,921 min	-9,921 min
Declinação	2,618°	2,618°	-9,229°	-9,229°	-3,219°	-3,219°
Efeito dos minutos	-	0,4 min	-	-4,52 min	-	-8,80 min
Altura solar	33,195°	33.109°	64,429°	66.003°	19,547°	16.964°
Ângulo horário	34,966°	35,166°	8,677°	6.417°	-55,28°	-59.68°
Ângulo Azimutal	43,168°	43,384°	159,81°	164,28°	-60,55°	-64.29°
Ângulo de incidência	56,804°	56,890°	25,570°	23,996°	70,452°	73,035°
Saída Solar	5 h: 43 min	5h: 46 min	5 h: 16 min	5h: 36 min	7 h: 15 min	7h: 14 min
Pôr do Sol	18 h: 9 min	18h: 13 min	18 h: 6 min	18h: 23 min	18 h: 46 min	18h: 45min
Duração do dia	12 h: 26 min	12h: 26 min	12 h: 49 min	12h: 47 min	11 h 30 min	11 h 30 min

6.3.2 Análise dos resultados do comportamento Solar

A tabela 6.3 mostra alguns dados do comportamento solar para a cidade de Itajubá em MG, Brasil. A análise visa simular o comportamento solar durante cada dia do ano; para isso são inseridas as correspondentes coordenadas do local onde está instalada a tecnologia solar, além do ano, mês, dia e hora civil. De tais informações será obtida:

- ✓ O efeito dos minutos, devido à localização geográfica.
- ✓ Os ângulos geométricos da posição do sol
- ✓ Hora da Saída do Sol
- ✓ Hora do Pôr do Sol
- ✓ O tempo de insolação solar durante o dia

Para calcular estes parâmetros são feitas as seguintes considerações:

- Cada fuso horário corresponde a uma área com distribuição geográfica de comprimento 15° , que é definida por apenas uma hora. A cidade de Itajubá não está sobre o meridiano de referência, por isso é calculado o efeito dos minutos que a cidade de Itajubá tem com relação ao meridiano de referência.
- Com a caracterização dos ângulos que descrevem o movimento relativo do sol, é possível projetar o sistema de rastreamento, minimizando o ângulo de incidência.
- O nascer e o pôr do sol nem sempre ocorrem na mesma hora todos os dias, já que durante o ano há dias mais longos e noites mais curtas, dependendo da época do ano.
- A duração de insolação durante o dia é importante para calcular o tempo de atividade do sistema Stirling.

As tabelas 6.3 e 6.4 mostram a variação dos ângulos que descrevem o movimento relativo do sol, para determinadas horas e dias do ano, que são muito úteis para projetar o sistema de rastreamento solar na cidade de Itajubá. Os resultados estão dados para os meses 1, 3, 6 e 9 e para três horas durante o dia (9h: 30 min, 11h: 45 min e 15h: 45min).

Tabela 6.3 Variação dos ângulos geométricos do movimento aparente do Sol, para a cidade de Itajubá em M.G-Brasil.

LOCALIZAÇÃO		CIDADE DE ITAJUBÁ EM M.G-BRASIL					
Dados de entrada							
Longitude	-45° 27' 6.101" W	-45° 27' 6.101" W	-45° 27' 6.101" W	-45° 27' 6.101" W	-45° 27' 6.101" W	-45° 27' 6.101" W	
Latitude	22° 24' 46.951" S	22° 24' 46.951" S	22° 24' 46.951" S	22° 24' 46.951" S	22° 24' 46.951" S	22° 24' 46.951" S	
Dia	15	15	15	15	15	15	
Mês	1	1	1	3	3	3	
Hora Civil	9 h: 30 min	11 h: 45 min	15 h: 15 min	9 h: 30 min	11 h: 45 min	15 h: 15 min	
Dados de saída							
Verão o inverno	1 h	1 h	1 h	0 h	0 h	0 h	
Hora Solar	8 h: 23 min	10 h:38 min	14 h: 08 min	9 h: 22 min	11h: 37 min	15 h: 07 min	
Equação do tempo	-8,6335 min	-8,6335 min	-8,6335 min	-9,6406 min	-9,6406 min	-9,6406 min	
Declinação	-21,2695°	-21,2695°	-21,2695°	-2,8189 min	-2,8189 min	-2,8189 min	
Efeito dos minutos	1,8 min	1,8 min	1,8 min	1,8 min	1,8 min	1,8 min	
Altura solar	39,9497°	70,9902°	60,2913°	47,0281°	69,6500°	40,6162°	
Ângulo horário	-54,208°	-20,458°	32,041°	-39,4601°	-5,7101°	46,7899°	
Ângulo Azimutal	-80,4112°	-89,5307°	86,0236°	-111,3705°	-163,3955°	106,4633°	
Ângulo de incidência	50,0503 °	19,0098	29,7087°	42,9719°	20,3500°	49,3838	
Ângulo de incidência (mínimo)	0°	0°	0°	0°	0°	0°	
Saída Solar	6 h :23 min	6 h :23 min	6 h :23 min	5 h: 55 min	5 h: 55 min	5 h: 55 min	
Pôr do Sol	19 h: 36 min	19 h: 36 min	19 h: 36 min	18 h: 4 min	18 h: 4 min	18 h: 4 min	
Duração do dia	13 h: 13 min	13 h: 13 min	13 h: 13 min	12 h: 9 min	12 h: 9 min	12 h: 9 min	

Tabela 6.4 Variação dos ângulos geométricos do movimento aparente do Sol, para a cidade de Itajubá em M.G-Brasil.

LOCALIZAÇÃO		CIDADE DE ITAJUBÁ EM M.G-BRASIL					
Dados de entrada							
Longitude	-45° 27' 6.101" W	-45° 27' 6.101" W	-45° 27' 6.101" W	-45° 27' 6.101" W	-45° 27' 6.101" W	-45° 27' 6.101" W	
Latitude	22° 24' 46.951" S	22° 24' 46.951" S	22° 24' 46.951" S	22° 24' 46.951" S	22° 24' 46.951" S	22° 24' 46.951" S	
Dia	15	15	15	15	15	15	
Mês	6	6	6	9	9	9	
Hora Civil	9 h: 30 min	11 h: 45 min	15 h: 15 min	9 h: 30 min	11 h: 45 min	15 h: 15 min	
Dados de saída							
Verão o inverno	0 h	0 h	0 h	0 h	0 h	0 h	
Hora Solar	9 h :31 min	11 h: 46 min	15 h: 16 min	9 h: 36 min	11 h : 51 min	15 h : 21 min	
Equação do tempo	-0,0219°	-0,0219°	-0,0219°	4,6416°	4,6416°	4,6416°	
Declinação	23,3144°	23,3144°	23,3144°	2,2169°	2,2169°	2,2169°	
Efeito dos minutos	1,8 min	1,8 min	1,8 min	1,8 min	1,8 min	1,8 min	
Altura solar	31,7875°	44,1726°	23,8305°	47,1990°	65,2947°	35,0743°	
Ângulo horário	-37,0555°	-3,3055°	49,1945°	-35,8896°	-2,1396°	50,3604°	
Ângulo Azimutal	-139,3803°	-175,7662°	130,5435°	-120,4420°	-174,8790°	109,9088	
Ângulo de incidência	58,2125°	45,8274°	66,1695°	42,8010°	24,7053°	54,9257°	
Ângulo de incidência (mínimo)	0°	0°	0°	0°	0°	0°	
Saída Solar	6 h:40 min	6 h:40 min	6 h:40 min	6 h:03 min	6 h:03 min	6 h:03 min	
Pôr do Sol	17 h: 19 min	17 h: 19 min	17 h: 19 min	17 h: 56 min	17 h: 56 min	17 h: 56 min	
Duração do dia	10 h: 38 min	10 h: 38 min	10 h: 38 min	11h :52 min	11h :52 min	11h :52 min	

6.3.2.1 Validação geral do sistema solar Disco/Stirling

A validação geral do sistema Disco/Stirling é realizada mediante a comparação dos resultados com valores mostrados pelas publicações em revistas científicas e literatura tais como o Compendium Solar. Para realizar a validação do modelo devem-se considerar os parâmetros de projeto, construção e materiais que não são fornecidos na literatura em geral e que são o principal fator de erro ao realizar a validação. Estes parâmetros são:

- Fator de configuração geométrica que depende da tipologia geométrica que tenha o prato refletor.
- Fatores geométricos como fator de sombreamento, fator de interceptação de energia solar, erro de dispersão, etc.
- Temperatura do receptor, que depende de parâmetros geométricos.
- Relação da distância focal
- Tipo de material utilizado no prato refletor e no receptor (Emitância, refletância, e absorvidade).
- Eficiência do gerador

6.3.2.2 Validação da Potência Elétrica

Os resultados mostrados na figura 6.11, para validação da potência elétrica obtida não estão sujeitos a parâmetros de projeto e fabricação mencionados acima, já que estes foram calculados ou assumidos de acordo com a literatura. No entanto, a margem de erros para cada caso é inferior a 9,72%.

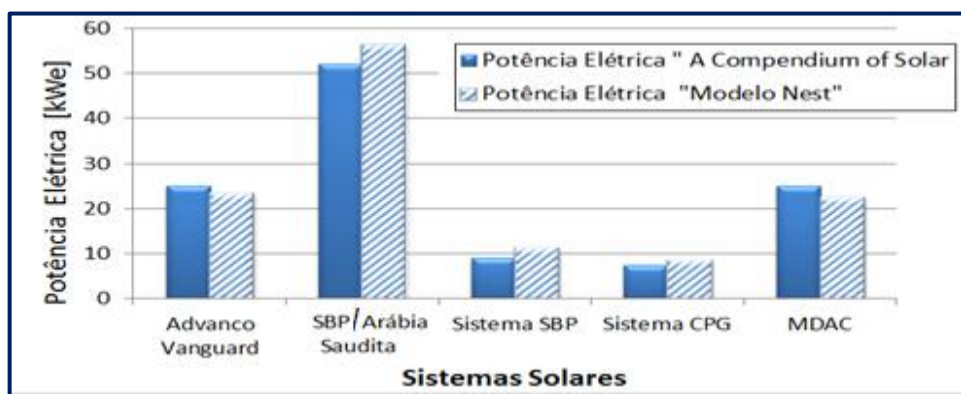


Figura 6.11 Validação da potência elétrica

6.3.2.3 Validação da eficiência do receptor

A validação da eficiência do receptor mostrada na figura 6.12, depende de fatores tais como a irradiação solar, relações de concentração e tipo de material da superfície do receptor. Para fins de simulação, o material é o mesmo para todas as tecnologias (superfície de cromo preto " $Cr - Cr_2O_3$ "). É possível estimar o valor de refletância no infravermelho (para $\lambda = 9 \mu m$) da ordem dos 70%, e, portanto sua seletividade para esse comprimento de onda é de $\beta = \alpha_{abs}/\varepsilon = 0,96/0,3 = 3,2$ (Di Lalla e E, 2005).

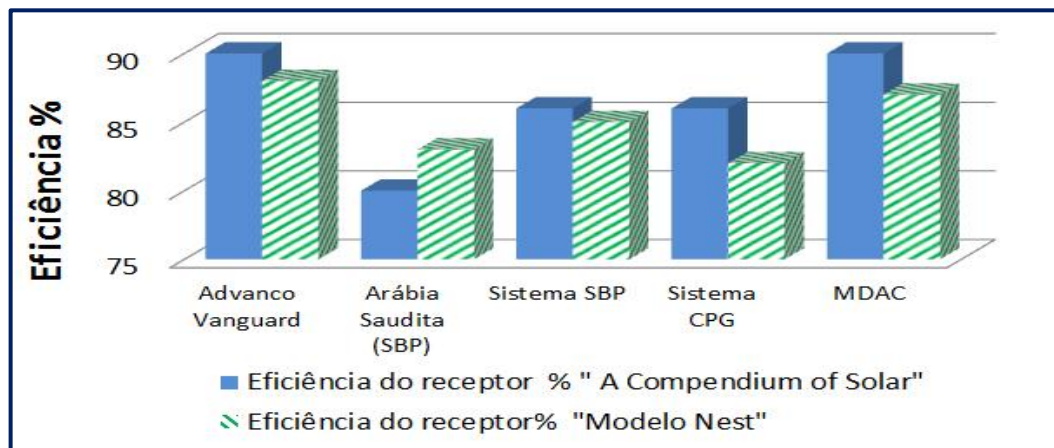


Figura 6.12 Validação da eficiência do receptor

6.3.2.4 Validação da eficiência geral do sistema

Para validar a eficiência geral do sistema mostrada na figura 6.13, é considerado o valor da constante de Stirling de ($K_s=0,55$) e uma eficiência do gerador dos 94%, a temperatura ambiente é assumida de 35 °C.

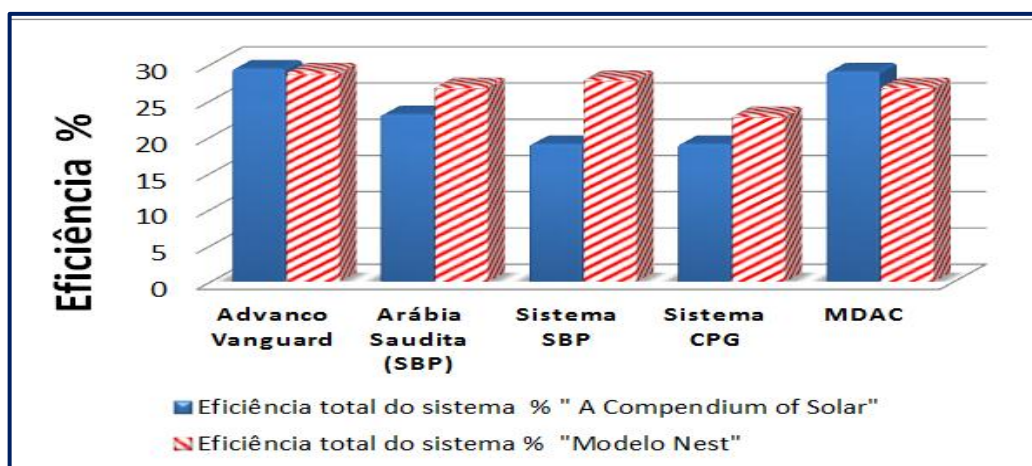


Figura 6.13 Validação da eficiência geral do sistema

A tabela 6.5, mostra a comparação dos resultados dados pelo modelo matemático NEST e a literatura especializada como o livro Compendium Solar. Durante a realização de uma simulação numérica existem dois tipos de erros, quando os resultados obtidos são comparados com os reais. Os quais podem ser: os erros numéricos, sendo estes resultados afetados pela falta de parâmetros e que são assumidos como: fatores de fabricação, configuração geométrica, fatores próprios do motor e gerador que não foram considerados, etc. O segundo tipo é o erro é devido ao uso das equações que representam adequadamente o comportamento do sistema. A identificação destes tipos de erros é realizada mediante uma validação numérica.

Tabela 6.5 Quadro comparativo da validação do modelo matemático

Tecnologia	Potência Elétrica- Compendium [kWe]	Potência Elétrica- NEST [kWe]	Porcentagem de erro %
Avanco Vanguard	25	23,48	6,08
Arábia Saudita (SBP)	52,5	56,9	8,38
MDAC/SES	25	22,6	9,6
Sistema SBP	9	11,4	26,67
Sistema CPG	7,5	8,6	14,67
Tecnologia	Eficiência do receptor- Compendium [%]	Eficiência do NEST [%]	Porcentagem de erro %
Avanco Vanguard	90	88	2,22
Arábia Saudita (SBP)	80	83	3,75
MDAC/SES	90	86	4,44
Sistema SBP	86	85	1,16
Sistema CPG	86	80	6,97
Tecnologia	Eficiência do sistema- Compendium [%]	Eficiência do NEST [%]	Porcentagem de erro %
Avanco Vanguard	29,4	29	1,36
Arábia Saudita (SBP)	23,1	27	16,88
MDAC/SES	29	27	6,89

Nas tabelas 6.6 e 6.7 mostram a comparação dos resultados obtidos pelo modelo NEST e as publicações feitas pelo Compendium Solar, para fazer a comparação global da validação de um sistema completo.

Tabela 6.6 Validação do modelo térmico (NEST-COMPEMDIUM SOLAR)

Sistema Solar	Avanço Vanguard	Avanço Vanguard (NEST)	Arábia Saudita (SBP)	Arábia Saudita (NEST)	Sistema CPG	Sistema CPG (NEST)
Operação do sistema						
Potência Elétrica kW	25	23,48	52,5	56,09	7,5	8,68
Eficiência	29,4 %	29,%	23,1%	27%	19 %	23%
Radiação solar W/m ²	1000	1000	1000	1000	950	950
Saída (térmica) kWt	62	-	142,6	-	42	-
Concentrador						
Diâmetro do coletor m	10,57	10,57	17	17	7,3	7,3
Área do projeto m ²	86,7	86,7	227	227	43,8	43,8
Angulo de borde	45 ⁰	45 ⁰	39 ⁰	34 ⁰	-	45 ⁰
Distância focal m	-	6,24	13,6	13,13	5,38 m	4,3
Relação Focal f/d	0,6	0,6	0,8	0,8	-	0,6
Refletividade	93,5%	93,5%	92%	92%	78% -85%	85%
Eficiência	89%	83%	78,7 %	82%	78%	76%
Concentração	2750	2782	600	611	1670	1672
Receptor						
Eficiência Térmica do receptor	90%	88%	80%	83%	86%	80%
Diâmetro do receptor [mm]	200	180	700	640	178	169
Temp. normal de funcionamento °C	720	-	720	-	-	-
Max. Temp. do tube (front-side) °C	810	804	800	808	675	791,21
Motor Stirling						
Potência kW _e	25	-	50	-	9	-
Temperatura gás (alta) °C	720	-	620	-	629	-
Eficiência Max.	41%	39 %	42%	39%	33%	39%

Tabela 6.7 Validação do modelo térmico (NEST-COMPEMDIUM SOLAR)

Sistema Solar	Sistema SBP	Sistema SBP (NEST)	MDAC/SES	MDAC/SES (NEST)
Operação do sistema				
Potência Elétrica kW	9	11,44	25	22,57
Eficiência	20,3%	25%	29 -30%	27%
Radiação solar W/m ²	1000	1000	1000	1000
Saída (térmica) kWt	31,1	-	-	-
Concentrador				
Diâmetro do coletor m	7,5	7,5	10,57	10,57
Área do projeto m ²	44,18	44,18	87,7	87,7
Angulo de borde	39 ⁰	39	39 ⁰	39 ^o
Distância focal m	4,5	5,18	7,45	7,28
Relação Focal f/d	-	0,7	0,7	0,7
Refletividade	94%	94%	91%	91%
Eficiência	82 %	83%	88,1 %	81%
Concentração	4000	4060	2800	2795
Receptor				
Eficiência Térmica do receptor	86%	85%	90%	86%
Diâmetro do receptor [mm]	120	112	200	186
Temp. normal de funcionamento °C	750	-	-	-
Max. Temp. do tube (front-side) °C	850	817	-	826
Motor Stirling				
Potência kW	9 -15	-	25	-
Temperatura gás (alta) °C	630	-	620	-
Eficiência Max.	30%	39%	42%	39%

6.3.3 Dados obtidos a partir do modelo para diferentes parâmetros de projeto

Já tendo validado o modelo, procede-se ao realizar o estudo de vários tipos de coletores solares Disco/Stirling a fim de fazer uma comparação do desempenho ao variar o tamanho do prato refletor e encontrar o melhor projeto de acordo com as necessidades exigidas pelo usuário.

Para realizar esses cálculos levaram-se em conta vários fatores preliminares de projeto para avaliar o desempenho de cada sistema, listados na tabela 6.8. Também foram considerados o tipo de material da superfície do espelho refletor e a superfície do receptor da tecnologia Dish/Stirling e são apresentados na Tabela 6.9.

Tabela 6.8 Parâmetros fixos no modelo solar

Parâmetros de entrada	Valores	Referências
Irradiação solar [W/m ²]	1000	Padrão
Temperatura ambiente média [K]	298	Autor
Configuração geométrica* fator de sombreamento	0,9	(Jaramillo S, 1998)
Erro de dispersão	0,98	(Jaramillo S, 1998)
Perdas por derrame	0,48	(Gavilán, 2007)
Fator de interceptação	0,90	(Zanganeh et al., 2010)
Constante Stirling [Ks]	0,5	(Banca e Somchai, 2005)
Constante de Stefan – Boltzmann [W/m ² K ⁴]	5,6697x10 ⁻⁸	Literatura

Tabela 6.9 Propriedades da superfície do coletor receptor

Superfície	Valor			Referências	
Refletividade “Prata brilhante”	0,94			(Howell e Siegel, 2002)	
Superfície	α_s	ϵ	α_s/ϵ	ρ_{recep}	Referências
Negro de Cr-Cr2O3	0,96	0,3	3,2	0,69	(Díez, 2002)
Negro de Cr2O3 com SnO ₂	0,92	0,15	6,1	0,67	(Díez, 2002)

6.3.4 Análise dos resultados do modelo para diferentes parâmetros de projeto

Para este estudo, primeiro foi realizado um estudo ótico-geométrico para diferentes dimensões do disco refletor. O valor de concentração solar é altamente dependente do ângulo de borda, resultando elevados níveis de concentração (da ordem de 40.000 soles) que não são tecnologicamente possíveis, devido às altas temperaturas. Assim foram tomados valores coerentes baseados na literatura científica para tornar-se mais ajustado à realidade.

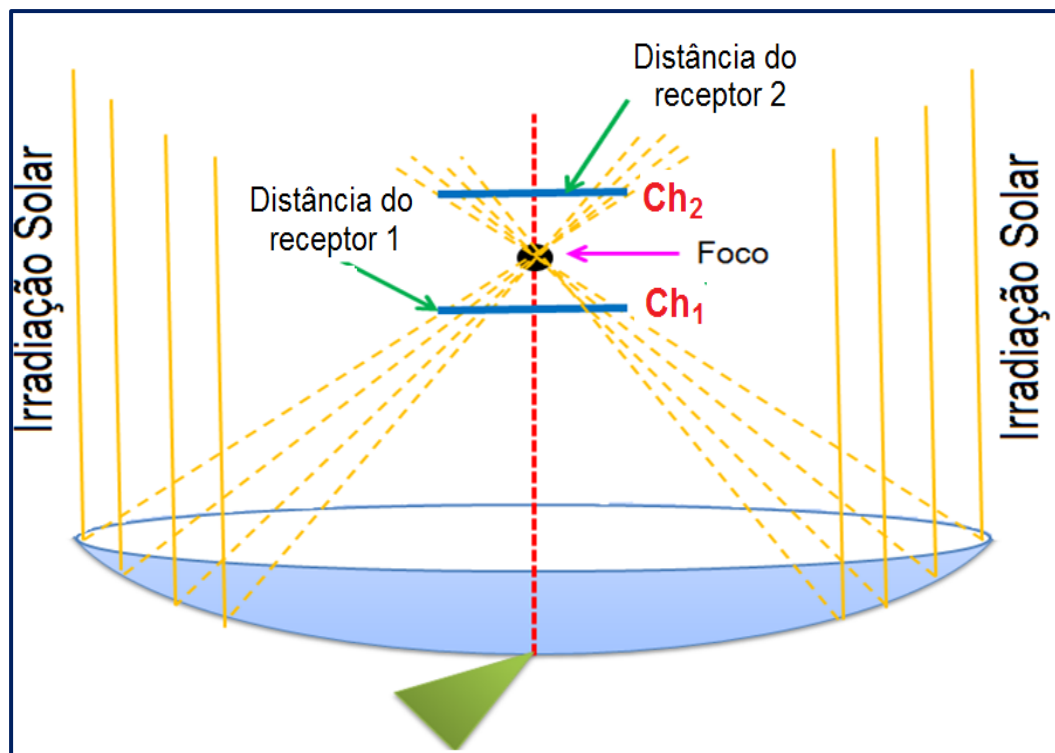


Figura 6.14 Distância ideal do receptor no sistemas Dish/Stirling

Na figura 6.14 mostram-se as distâncias Ch_1 e Ch_2 onde podem estar situados os receptores. A tabela 6.10, apresenta os resultados obtidos do modelo geométrico.

Tabela 6.10 Parâmetros geométricos do projeto

Diâmetro do coletor [m]	1,8	2,5	4,5	6,5	7,3	7,5	10,57	17
Superfície do coletor [m²]	2,545	4,909	15,904	33,183	41,854	44,179	87,748	226,980
Ângulo de borda [rad]	0,7896	0,7896	0,7896	0,7896	0,7896	0,7896	0,7896	0,7896
Foco geométrico [m]	1,08	1,50	2,70	3,9	4,38	4,5	6,34	10,20
Foco de projeto 1 [m] Ch1	1,035	1,458	2,640	3,813	4,29	4,41	6,24	10,05
Foco de projeto 2 [m] Ch2	1,125	1,542	2,76	3,987	4,47	4,59	6,44	10,35
Concentração geométrica	9544	9544	9544	9544	9544	9544	9544	9544
Concentração de projeto	400	900	1400	1400	1800	1800	2800	3400
Concentração real	360,96	812,16	1263	1263	1624	1624	2526	3068
Diâmetro do receptor [m]	0,090	0,0833	0,120	0,173	0,173	0,177	0,199	0,291
Superfície do receptor [m²]	0,0064	0,0055	0,0114	0,023	0,023	0,025	0,031	0,066

As tabelas 6.11 e 6.12 apresentam a descrição completa do comportamento térmico e elétrico do sistema de geração de eletricidade, comparando várias metodologias propostas por alguns autores como: Banha e Somchai, 2005; Stine e Diver, 1994 e Ciemat, 2009. As tabelas são divididas em várias etapas:

1. Parâmetros térmicos
2. Eficiências Disco/Stirling
3. Potência do sistema Disco/Stirling
4. Parâmetros de projeto para máxima eficiência e máxima potência

Tabela 6.11 Comportamento do modelo geral para diferentes parâmetros de projeto.

PARÂMETROS TÉRMICOS-ELÉTRICOS DO PROJETO									
Diâmetro do coletor [m]	1,8	2,5	4,5	6,5	7,3	7,5	10,57	17	20
PARÂMETROS TÉRMICOS									
Temperatura do receptor media [°C]	725,82	712,41	705,49	705,49	712,41	712,41	705,49	705,49	705,49
Coeficiente de perdas de convecção h_c	12,37	12,37	12,37	12,37	12,37	12,37	12,37	12,37	12,37
Perdas de radiação [W] Q_{rh}	0,107	0,868	0,176	0,367	0,370	0,391	0,485	1,004	1,389
Perdas de convecção [W] Q_c	0,056	0,046	0,095	0,199	0,197	0,208	0,264	0,546	0,775
Perdas globales [W] Q_{per}	0,162	0,133	0,271	0,566	0,568	0,599	0,749	1,550	2,145
Energia no absorvedor [kW] Q_{abs}	1,442	2,781	9,442	19,700	24,874	26,23	52,094	134,75	186,51
Energia útil [kW] Q_u	1,280	2,648	9,170	19,136	24,279	25,63	51,345	133,20	184,36
EFICIÊNCIA DO SISTEMA DISH/STIRLING									
Eficiência instantânea %	50,3	53,96	57,66	57,66	58,01	58,01	58,51	58,68	58,68
Eficiência de captação no receptor %	64,53	64,53	64,53	64,53	64,53	64,53	64,53	64,53	64,53
Eficiência do absorvedor %	88,32	88,32	88,32	88,32	88,32	88,32	88,32	88,32	88,32
Eficiência do concentrador %	82,96	82,96	82,96	82,96	82,96	82,96	82,96	82,96	82,96
Eficiência do Receptor "Banca" %	83,87	87,53	88,53	88,53	88,88	88,88	89,39	89,56	89,56
Eficiência do Receptor "Cimat" %	90,40	89,16	88,83	88,83	88,74	88,74	88,58	88,52	88,52
Eficiência do Receptor Compend %	77,32	83,84	85,51	85,51	86,08	86,08	86,91	87,17	87,19
Eficiência do Sistema solar "Banca" %	24,7	25,63	25,85	25,85	26,03	26,03	26,09	26,14	26,14
Eficiência do Sistema solar "Cimat" %	26,63	26,11	25,93	25,93	25,99	25,99	25,86	25,84	25,84
Eficiência do Sistema solar "Compend" %	22,77	24,55	24,96	24,96	25,21	25,21	25,37	25,45	25,45

Tabela 6.12 Comportamento do modelo geral para diferentes parâmetros de projeto.

PARÂMETROS TÉRMICO-ELÉTRICOS DO PROJETO									
Diâmetro do coletor [m]	1,8	2,5	4,5	6,5	7,3	7,5	10,57	17	20
POTÊNCIA DO SISTEMA DISH/STIRLING									
Potência do sistema "Bancha" [kWe]	0,628	1,258	4,110	8,57	10,894	11,499	22,898	59,343	82,213
Potência do sistema "Ciemat" [kWe]	0,667	1,281	4,124	8,6	10,876	11,480	22,690	58,659	81,190
Potência do sistema "Compend" [kWe]	0,579	1,205	3,97	8,28	10,550	11,136	22,264	57,778	79,960
PARÂMETROS TÉRMICOS PARA CONDIÇÕES MÁXIMAS DE EFICIÊNCIA E POTÊNCIA									
T° Para condição de máxima eficiência [K]	1114	1315	1437	1437	1511	1511	1650	1725	1725
Eficiência máxima possível % EfficMax_sistema	59,47	64,35	66,29	66,29	67,82	67,82	69,77	70,68	70,68
T° Condição de potência máxima [K]	1201	1433	1576	1576	1664	1664	1829	1919	1919
Eficiência máxima no sistema "Usando a T° Para condição de máxima potência" % EfficMax_Potência	21,70	24,15	25,17	25,17	26,03	26,03	27,15	27,69	27,69
Eficiência no motor "Usando a T° Para condição de máxima potência" %	25	27,1	28,18	28,18	29,82	29,82	30	30,23	30,23

* A eficiência máxima foi multiplicada pela constante Stirling $K_s=0,5$

Da tabela 6.9, pode-se deduzir que as perdas por radiação e convecção variam de acordo com a variação do diâmetro do coletor como mostra a figura 6.15. A partir de 10,57 m de diâmetro do coletor, as perdas de radiação e convecção são consideráveis, isto é devido ao aumento do fluxo de calor refletido pelo coletor para o receptor, aumentando a temperatura na cavidade deste.

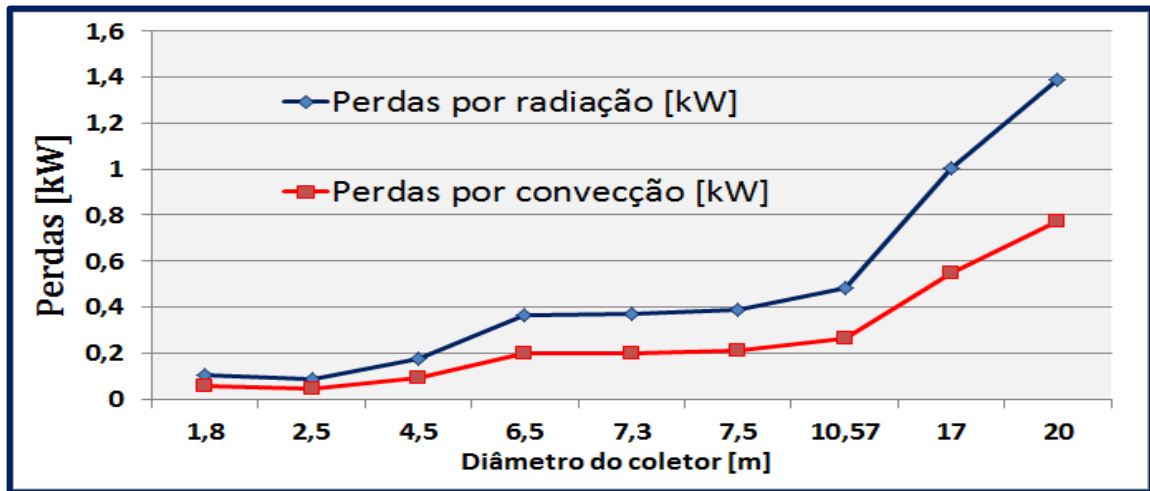


Figura 6.15 Influência do diâmetro de abertura do coletor sobre as perdas por radiação e convecção

A variação da eficiência do receptor mostrada na tabela 6.9 em função do diâmetro do coletor é mostrada na figura 6.16, onde se observa que para diâmetros maiores a 4,5 m os valores de eficiência são mantidos constantes entre 85% e 90%. Observe-se que as metodologias de CIEMAT e Banchar são muito próximas e tem valores de eficiência maiores que a metodologia de Compendium, devido a que este último tem em conta a eficiência no coletor para calcular a eficiência no receptor.

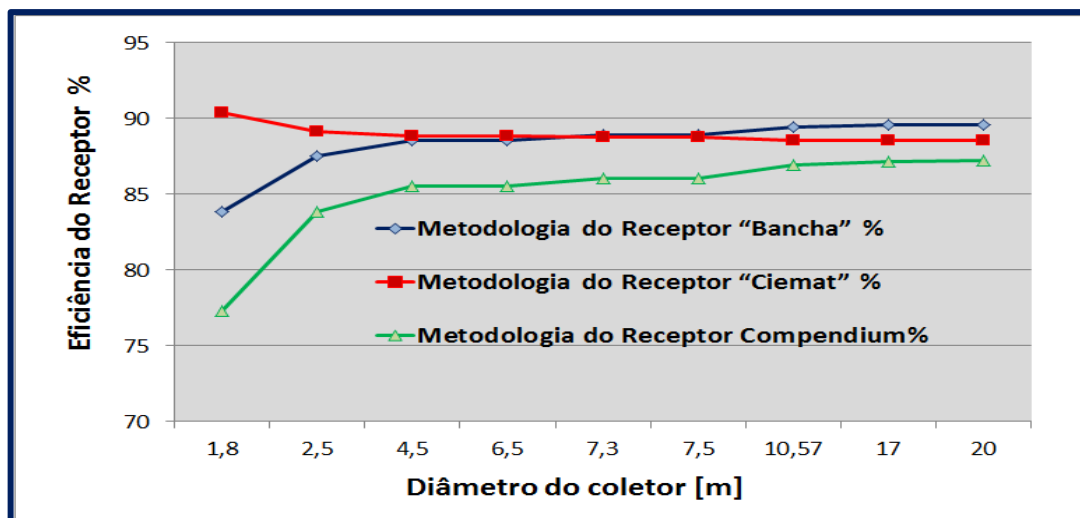


Figura 6.16 Influência do diâmetro de abertura do coletor sobre as eficiências do receptor utilizando três metodologias

A figura 6.17, mostra o cálculo de conversão da energia solar em energia elétrica de acordo a três metodologias (Bancha, Ciemat e Compendium). Para calcular a eficiência térmica do motor Stirling, é considerada a constante tecnológica Stirling como $K_s = 0,55$ e a eficiência do gerador foram assumidas de $\eta_{Gerador} = 92 \%$.

Esta potência está limitada pelo nível tecnológico dos motores Stirling, já que sua capacidade é de 25 kWe por unidade, isto é devido à grandes temperaturas que atingem o receptor, tipo de materiais dos elementos para suportar altas temperaturas, configuração geométrica para aproveitar a radiação solar, etc.

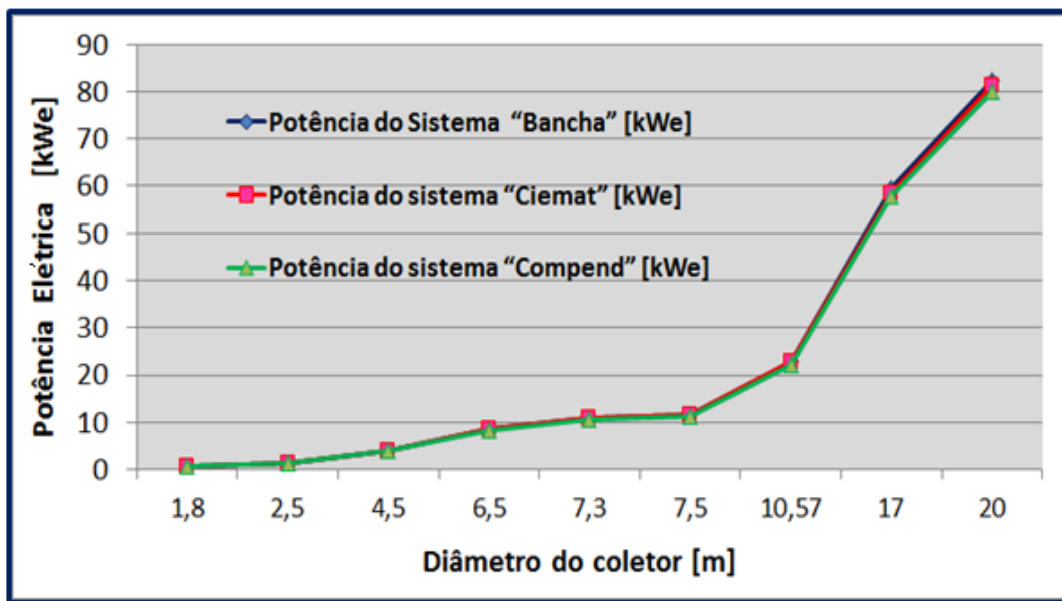


Figura 6.17 Influencia do diâmetro de abertura do coletor sobre a potência elétrica do sistema

A Figura 6.18 mostra o comportamento do sistema para o dia 15/04/2010. As colunas sombreadas representam a diminuição da quantidade de energia disponível em cada etapa do processo de conversão, e as colunas listradas representam a variação da eficiência em cada etapa do processo térmico que é expresso na eixes da abcissa. Observe-se que a energia solar (coluna sombreada) representa um 100% e esta corresponde neste instante um 100% da energia capturada pelo espelho colector (coluna listrada), mas é observado a seguir que a eficiência do gerador é de 92% (coluna tracejada), mas a energia disponível neste estágio é de 28% (coluna sombreada), Isto ocorre porque em estágios anteriores do processo apresenta-se perdas significativas na cavidade do receptor.

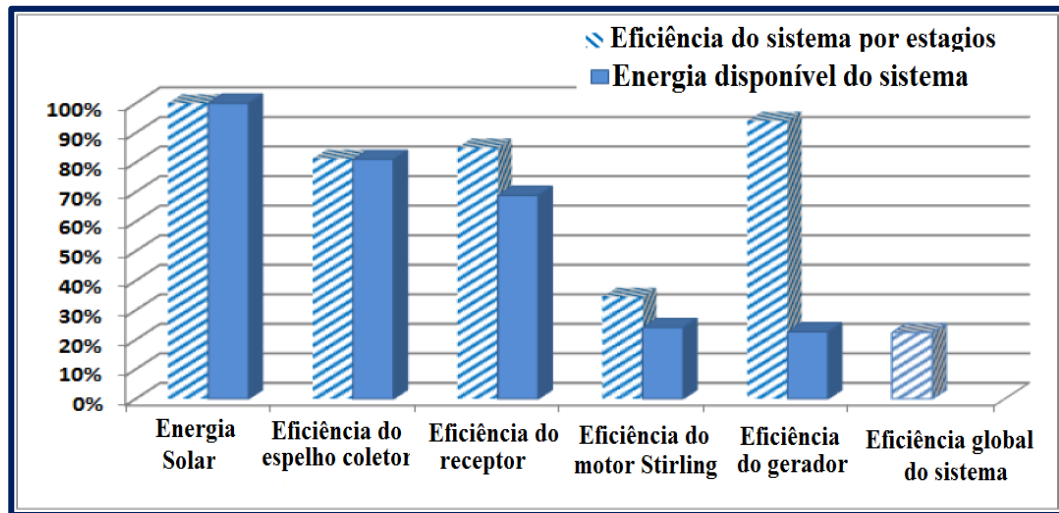


Figura 6.18 Comportamento do sistema Dish/Stirling

A maioria das perdas do sistema de conversão de energia solar em energia elétrica Dish/Stirling, é apresentada na cavidade do receptor, os mecanismos que contribuem para as perdas totais no sistema são: as perdas por condução através do Receptor/Motor (não são tidas em conta neste modelo matemático), as perdas por convecção apresenta-se na cavidade do receptor, e radiação através da abertura para o ambiente envolvente. A distribuição das eficiências num sistema Dish/Stirling é apresentada na figura 6.19.

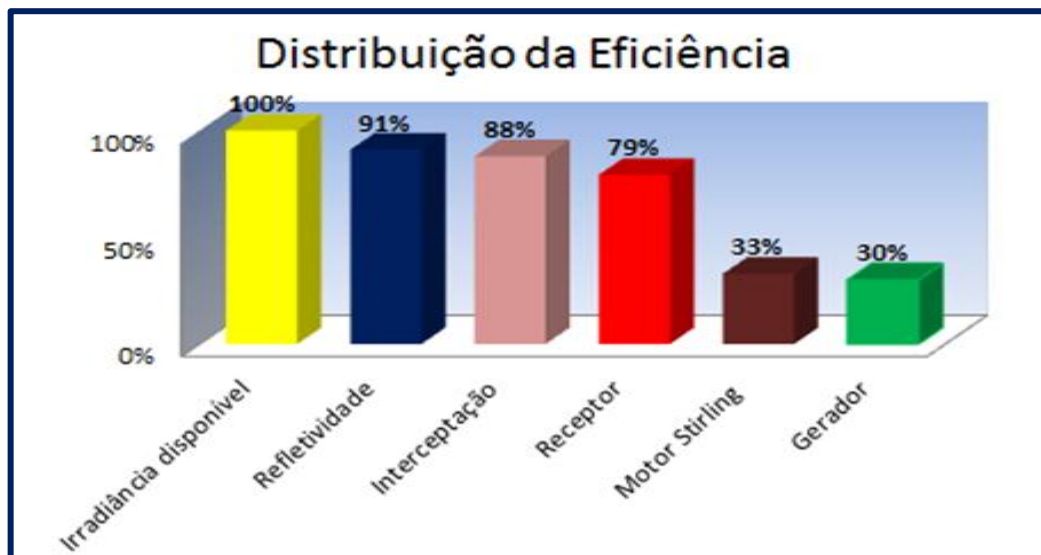


Figura 6.19 Distribuição das perdas no sistema Dish/Stirling para geração de energia elétrica (Mancini, 1997)

É evidente que as perdas no receptor representam uma fracção significativa das perdas totais do sistema, e para uma representação precisa destas perdas é necessário um modelo matemático de previsão de energia em longo prazo (Fraser, 2008).

Capítulo 7.

CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E RECOMENDAÇÕES.

7.1 CONCLUSÕES

Através do estudo das distintas tipologias das tecnologias Dish/Stirling na revisão bibliográfica, foi possível determinar indicadores que refletem pontos de comparação entre as mesmas tecnologias, para fornecer informações não perceptíveis do comportamento do sistema.

Os resultados obtidos da eficiência global e a potência elétrica do sistema mostram problemas com os transitórios de nebulosidade, afetando diretamente a geração de energia elétrica, já que a aplicação do modelo matemático proposto considera fatores climáticos na cidade de Itajubá como: velocidade do vento, temperatura ambiente e irradiação solar, que são amostradas todos os dias.

Foi realizado um modelo matemático para simulação e projeto de um sistema termo solar Dish/Stirling, com a finalidade de apresentar uma análise de sensibilidade dos parâmetros do projeto, para prever o comportamento na produção de potência elétrica, para cada dia na cidade de Itajubá.

Os dados obtidos no modelo para o sistema Advanco/Vanguard de 25-kWe, considerando a irradiação solar de 1000 W/m^2 foram: concentração de 2526 soles, eficiência global do sistema de 28%, e potência de 21 kWe. A porcentagem de erro na comparação

entre os dados reais e os dados obtidos pelo modelo matemático (NEST) foi 6.05%. Este percentagem depende de parâmetros como: materiais utilizados na fabricação do sistema, configuração geométrica, fator de sombra, etc., que não são encontrados na literatura técnica especializada aumentando o erro nos valores dados pelo modelo.

A correção de fuso horário para o local onde este instalado o sistema solar é de suma importância para estimar a HSV “Hora Solar Verdadeira” e estabelecer os ângulos necessários para criar o controle de rastreamento exato para minimizar o ângulo de incidência e determinar as horas de duração do sol para calcular a potência diária, além de maximizar a eficiência ótica no coletor e a energia térmica na cavidade do receptor. O modelo foi validado com um software chamado SUNRISE, com percentual de erro na medição do ângulo de incidência de 0,35%.

No modelo geométrico do Coletor/Receptor, os resultados permitem visualizar a distância onde deve ficar o receptor para diferentes dimensões do disco coletor e calcular os ângulos para maximizar a temperatura no absorvedor. Para manter a máxima concentração solar na cavidade do receptor, o ângulo de borda do prato refletor deverá ser de 45 graus.

A elaboração do balanço térmico permitiu comprovar a influencia que tem os fatores como: rastreamento solar ótimo, projeto geométrico, materiais da fabricação, etc., sobre a eficiência global do sistema. Para coletores maiores de 4,5 m a eficiência do receptor tende a se estabilizar entre 87% e 89%, e a eficiência global do sistema Dish/Stirling entre 23% e 25%.

Com respeito à validação, as diferenças encontradas entre os valores obtidos pelo programa de cálculo e os valores dados pela literatura especializada são menores que o 26 %; deste modo, é possível afirmar que a ferramenta desenvolvida garante a obtenção de valores válidos para o projeto de sistemas Dish/Stirling.

Os dias típicos simulados para a cidade de Itajubá M.G- Brasil, foi encontrado que as eficiências medias estão entre 20 a 24% e a faixa de funcionamento dos sistemas Dish/Stirling é de aproximadamente 5 horas durante o dia, gerando aproximadamente 10 kWe.

Nos dias típicos simulados para a cidade de Itajubá, observa-se que apresenta fenômenos descontínuos da irradiação solar que atinge a superfície da cidade, isto produz que o sistema tenha problemas no dimensionamento e funcionamento do sistema Dish/Stirling.

Foi determinada a temperatura óptima para os dois métodos de cálculo de eficiência: Malmo e Curzon Alhborn sendo que para o primeiro se precisa uma menor temperatura na superfície do receptor. Mostrando que a eficiência de Malmo ainda é otimista.

A eficiência de Carnot está fora do alcance da ação dos processos térmicos reais, tornando-se excessivamente elevados para refletir o desempenho dos processos existentes, que convertem energia térmica em trabalho mecânico. A metodologia de Curzon-Ahlborn demonstra ser o mais aproximada com o desempenho real dos sistemas térmicos.

Os resultados obtidos nesta dissertação foram obtidos a partir da metodologia apresentada no transcurso do trabalho, mostra a influência que tem a configuração geométrica do Disco/Receptor e as condições climáticas como temperatura ambiente, velocidade do vento e irradiação solar no comportamento do sistema Dish/Stirling na cidade de Itajubá-MG, Brasil.

7.2 CONTRIBUIÇÕES

O trabalho faz uma contribuição através da revisão bibliográfica, coletando informações e dados das características do comportamento da tecnologia Dish/Stirling que estão disponíveis na literatura especializada, identificando e mostrando em forma de indicadores os aspectos relevantes para o estudo da evolução e desempenho desta tecnologia como: capacidade de geração de energia elétrica por unidade de área do coletor, capacidade de geração de energia térmica por unidade de área do receptor, comparação da capacidade de concentração geométrica, etc.

O modelo fornece uma ferramenta de projeto de sistemas Dish/Stirling de grande utilidade para diferentes configurações geométricas do coletor, diferentes tipos de materiais no coletor-receptor; tendo em conta parâmetros reais como velocidade do vento, irradiação solar e temperatura ambiente para o dimensionamento e prever os efeitos do desempenho do sistema solar na cidade de Itajubá-Brasil.

7.3 RECOMENDAÇÕES

Para trabalhos futuros, recomenda-se um levantamento bibliográfico mais extenso e aprofundado na área de receptores pontuais das tecnologias mais recentes Disco/Stirling, para continuar descrevendo a evolução e comportamento do sistema solar com novos indicadores tecnológicos de forma mais detalhada e exata.

Ao modelo geral do sistema solar, pode-se adicionar novas rotinas ou modelos térmicos para representar os fenômenos de transferência de calor existentes em cada etapa do sistema Dish/Stirling, especialmente na superfície do absorvedor. Com isso, o software se tornará uma ferramenta capaz de realizar novos estudos dos efeitos óticos e térmicos mais precisos.

O modelo desenvolvido, precisa de um contínuo progresso para aperfeiçoar os cálculos realizados, além de incluir novos parâmetros que afetam o comportamento do sistema que não foram tidos em conta como: diferentes geometrias e tipos dos receptores, tipos de fluidos de trabalho, outros fatores climáticos, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAS, M., BOUMEDDANE, B., SAID, N., & CHIKOUCHE, A. (April de 2011). Dish Stirling technology: A 100 MW solar power plant using hydrogen for Algeria. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, pp. 4305-4314.
- ADKINS, D. R., BRADSHAW, R., GOODS, S., MORENO, J., & MOSS, T. (2002.). Mass Transport, Corrosion, Plugging and their Reduction in Solar Dish Stirling Heat Pipe Receivers. *Energy Conversion Engineering Conference*, vol 2, pp. 307 - 1313.
- ALONSO S., F. (2004). *SIG aplicados al análisis y cartografía de riesgos climáticos*. Universidad de Murcia. Dpt Geografía Física, Humana y Análisis Geográfico Regional, Murcia, 1-170 p.
- ANDRAKA, C. E., RAWLINSON, K. S., MOSS, T. A., & ADKINS, D. R. (11 de Agosto de 1996.). Solar Heat Pipe Testing of the Stirling Thermal Motors 4-120. *Energy Conversion Engineering Conference "IECEC ", II*. 1295 - 1300 p.
- ANDRAKA, C., MORENO, J., DIVER, R., GINN, W., DUDLEY, V., & RAWLINSON, K. (June de 1990). Reflux Pool-boiler As A Eieat-transport Device For Stirling Engines: On-sun Test Program Results. vol 5, pp. 274 - 280.
- BANCHA, K., & SOMCHAI, W. (25 de February de 2005). Optimum absorber temperature of a once-reflecting full conical concentrator of a low temperature differential Stirling engine. *Renewable Energy*. vol 30, pp. 1671–1687.
- BARBIERI, A. F., & SODRÉ, U. (24 de março de 2005). *Matématica Essencial: Fundamental: Funcao quadratica*. Recuperado el 30 de janeiro de 2011, de <http://pessoal.sercomtel.com.br/matématica/fundam/eq2g/quadratica.htm>

- BATISTA, R. L. (2007). *Geração de energia elétrica com coletor solar e motor stirling*. Universidade de São Paulo escola Politécnica, Engenharia Mecânica, São Paulo, 1-95 p.
- BAUMÜLLER, A., & SCHIEL, W. (1997). Single acting 10 kWe Stirling engine Application and results. *Proceedings of the 8. International Stirling Engine Conference*, University of Ancona, Italy, 26.-30 p.
- BEJAN, A. (1984). *CONVECTION HEAT TRANSFER*. New York: John Wiley & Sons.
- BERGAMASCO, R. (2007). *Projeto e avaliação teórica e experimental de sistemas de geração de eletricidade a partir da biomassa utilizando motores Stirling*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá , Pós-graduação em Engenharia da Energia, Itajubá, 1-164 p.
- BERGERMANN, S., & GBR, P. (2001). *EuroDish – Stirling System Description*. Stuttgart: European Community under Contract.
- BURGESS, G., LOVEGROVE, K., COVENTRY, J., DENNIS, M., & PRESTON, J. (2006). *Investigation of Combined Solar Thermal Power Generation and Desalination in the Murray Irrigation Limited Area of Operation*. ANU Report number STG – TR - 49, The Australian National University, Department of Engineering Australian National University Canberra ACT 0200, Canberra, 1-147 p.
- CANAZIO, A. (09 de 08 de 2011). *CANAL ENERGIA*. Recuperado el 19 de 08 de 2011, de <http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/autenticaUsuario/?er=403.05>
- CASALS, X. G. (2001). *Energia solar térmica de alta temperatura como alternativa a las centrales térmicas convencionales y nucleares*. Madrid: Universidad pontificia de comillas, 1-187 p.
- CASTELLANOS, C., FLOREZ, D., HEREDIA, C., MONCADA, L., & REYSANCHO, I. (2009). *Energía Solar*. Escuela Politécnica Nacional, Energías Alternativas, Quito-Ecuador, 1-269 p.
- CIEMAT. (2008). *Sistemas Solares Térmicos de Concentración*. Madrid, España: Ciemat, 1-417 p.
- CIEMAT. (2009). *Plataforma Solar de Almería*. Centro de investigaciones Energeticas, Medioambientales y Tecnologicas . Almería: Ministerio de Ciencia e Innovación Gobierno de España.

- DELFINO, L. L. (21 de December de 2007). On Optimization of a Non-Endorreversible Curzon-Ahlborn Cycle. *Entropy*, vol 9, pp. 186-197.
- DELYANNIS, E. (November de 2003). Historic background of desalination and renewable energies. *Solar Energy*, vol. 75, pp. 357-366.
- DEMEMO, E., & GALDO, J. (1997). *Renewable Energy Technology Characterizations*. Washington, D.C.: Electric Power Research Institute; U.S. Department of Energy, 1-283 p.
- DI LALLA, N., & E, F. (2005). Ensayos de degradación térmica de superficies de cromo negro. *ASADES*, vol 9, pp. 1-9.
- DÍEZ, P. F. (2002). *Procesos Termosolares en baja, media y alta temperatura*. Universidad de Cantabria, Departamento de ingeniería eléctrica y energética, 1-264 p.
- DIVER, R., ANDRAKA, C., MORENO, J., ADKINS, D., & MOSS, T. (1990). Trends In Dish-stirling Solar Receiver Designs. Energy Conversion Engineering Conference, 1990. IECEC-90. Proceedings of the 25th Intersociety, 303-310 p.
- DRACKE, R., & DE LAQUIL III, P. (1996). Progress Commercializing Solar-Electric Power Systems. *Rev. Energy Environ*. Annual Review of Energy and the Environment. Vol 21, pp. 371-402.
- DUFFIE, J. A., & BECKMAN, W. A. (1980). *Solar Engineering of Thermal Processes* (Vol. Second Edition). (J. W.-I. Publication, Ed.) Madison, Wisconsin, USA, 1-775 p.
- ENDESA, C. (2010). Informe de sostenibilidad 2010.
- ENRÍQUEZ, C. L., & GUADALUPE, A. J. (2011). *Diseño y construcción de un motor Stirling solar para el laboratorio de termodinámica*. Proyecto previo a la obtención del título de ingeniero mecánico, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, 1-276 p.
- FRASER, P. R. (2008). *Stirling Dish System Performance Prediction Model*. MASTER OF SCIENCE MECHANICAL ENGINEERING, UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON, MECHANICAL ENGINEERING, 1-203 p.
- GUVEN, H. M., & BANNEROT, R. B. (1984). *Optical and thermal analysis of parabolic trough solar collectors for technically less developed countries*. University of Houston -University Park, Mechanical Engineering Department -Texas, 1-143 p.

- GAVILÁN, A. (2007). *Desarrollo de programa de simulación para el cálculo de distribución de flujo radiante sobre receptor y fenómeno de desbordamiento a partir de una caracterización óptico-geométrica en un sistema de concentración solar disco-Stirling*. Proyecto Fin de Carrera, Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, Ingeniería Energética, Sevilla, 1-143 p.
- GEYER, M. (2007). *Dish Stirling Activities at Schlaich Bergermann*. Berlin: www.sbp.de.
- GÓMEZ, C. A. (2011). *Diseño del campo de heliostatos para torres solares de receptor central*. Especialidad Tecnologías Energéticas, Universidad Carlos III De Madrid Escuela Politécnica Superior, Ingeniería Térmica y Fluidos, Madrid, 1-138 p.
- GONZALEZ, B. (Marzo de 25 de 2012). *Los expertos en CSP comparten su opinión sobre el estado del sector en 2012*. 6ª CSP Today USA. Recuperado el 28 de Marzo de 2012, de: <http://es.csptoday.com/mercados/los-expertos-en-csp-comparten-su-opini%C3%B3n-sobre-el-estado-del-sector-en-2012>
- GONZALEZ, B. (29 de Febrero de 2012). *Reactivación del mercado termosolar en EE. UU.* CSP Today. Recuperado el 24 de marzo de 2012, de CSP today: http://es.csptoday.com/mercados/reactivaci%C3%B3n-del-mercado-termsolar-en-ee-uu?utm_source=http%3a%2f%2fuk.csptoday.com%2ffc_csp_pvlz%2f&utm_medium=email&utm_campaign=CSP+eBrief+29+Feb+12+SP&utm_term=Reactivaci%C3%B3n+del+mercado+termsolar+en+EE.+UU.&
- GREENPEACE. (2009). *Termoeléctrica Energía Solar*. España.
- GUAL, E. J. (2009). *Disseny d'un captador solar d'alta temperatura, amb motor Stirling i disc parabòlic*. Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Enginyeries Industrial i Aeronàutica de Terrassa, 1-155 p.
- HOFF, J., HUALLPAYUNCA, R., VON BODUNGEN, O., & VALLO, M. (15 de Julho de 2004). Recuperado el 6 de Fevereiro de 2011, de SUNRISE: http://131.173.116.141/PV-Anlage/sunrise/sunrise_es.html
- HOWARD, D., & HARLEY, R. G. (29 de July de 2009). Modeling of Dish-Stirling Solar Thermal Power Generation. *Power and Energy Society General Meeting*, p. 1-7.
- HOWELL, J. R., & SIEGEL, R. (2002). *Thermal Radiation Heat Transfer* (4th Edition ed.). New York: Taylor & Francis, 1-169 p.
- ITAJUBA, P. M. (2011). Recuperado el 1 de Janeiro de 2012, de <http://www.itajuba.mg.gov.br/index.php>

- JARAMILLO S, O. A. (1998). *Transporte de energía solar concentrada a través de fibras ópticas: Acoplamiento Fibra-Concentrador Estudio Térmico*. Maestría en Energía Solar, Universidad autónoma de México, Morelia, 1-171 p.
- JESSICA, G. T. (2010). *Diseño de refrigerador solar por absorción para clima cálido húmedo*. Tesis para obtener el grado de maestría en tecnología avanzada, Instituto Politécnico Nacional, Centro de investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada, Querétaro, 1-115 p.
- JOHNSTON, G. (1995). Flux mapping the 400 m² Big Dish at the Australian National University. *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 117, pp. 290-292.
- KALOGIROU, S. (June de 2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, vol 30, pp. 231-295.
- KALTSCHMITT, M., STREICHER, W., & WIESE, A. (2007). *Renewable Energy*. Institute for Energy and Environment (IE) gGmbH. Leipzig, Germany, 1-590 p.
- KANDILLI, C., & ULGEN, K. (31 de May de 2007). Review and modelling the systems of transmission concentratéd solar energy via optical fibres. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 67-84 p.
- KAUSHIKA, N., & REDDY, K. (17 de August de 1999). Performance of a low cost solar paraboloidal dish steam generating system. *Energy Conversion & Management*, 713-726 p.
- KECK, T., & SCHIEL, W. (2003). Envirodish and Eurodish- System and Status. 1-7 p.
- LOSADA, J. S. (2009). *Análisis de un sistema de disco parabólico con motor Stirling*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior, 1-114 p.
- LOVEGROVE, K., BURGESS, G., MCCREADY, D., & PYE, J. (2009). ANU's new 500 m² paraboloidal dish solar concentrator. *Solar Energy*, vol. 85, pp. 620-626.
- LOVEGROVE, K., LUZZI, A., SOLDIANI, I., & KREETZ, H. (2004). Developing ammonia based thermochemical energy storage for dish power plants. *Solar Energy*, Vol. 76, pp. 331-337.
- LOVEGROVE, K., ZAWADSKI, A., & COVENTY, J. (2007). Paraboloidal dish solar concentrators for multi-megawatt power generation. *Solar World Congress- Beijing*, 18 – 22 p.
- MANCINI, T. R. (1997). Solar- Electric Dish Stirling System development, 1-10 p.

- MELLA, N. V. (2005). *Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes del satélite NOAA. Aplicación a la Península Ibérica*. Universidad Pólitecnica de Cataluña , Programa de Doctorado en Ingeniería Ambiental, Barcelona, 1-368 p.
- MILLS, D. (2004). Advances in solar thermal electricity technology. *Solar Energy*. Solar World Congress 2001.vol 76, pp. 19-31.
- MINASSIANS, A. (2007). *Stirling Engines for Low-Temperature Solar-Thermal-Electric Power Generation*. A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, University of California, Berkeley , Engineering - Electrical Engineering and Computer Sciences, California, 1-207 p.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, T. E.-B. (1 de Julho de 2010). *Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos*. Recuperado el 1 de Janeiro de 2011, de <http://www1.cptec.inpe.br/>
- MOHAMED, A., BOUSAAD, B., NOUREDDINE, S., & AHMED, C. (April de 2011). Dish Stirling technology: A 100 MW solar power plant using hydrogen for Algeria. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, pp. 4305-4314.
- MONTES P, M. (2008). *Ánàlisis y propuestas de sistemas solares de alta exergía que emplean agua como fluido calorífico*. Tesis para obtener el grado de maestria, Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales, Departamento de ingeniería Energética y Fluidomecanica, Madrid, 1-322 p.
- NEPVEU, F., FERRIERE, A., & BATAILLE, F. (January de 2009). Thermal Model of a Dish/Stirling Systems. *Solar Energy*, vol. 83, pp. 81-89.
- NEWTOM, C. C. (2007). *A Concentratéd Solar Thermal Energy System*. A Thesis submitted to the Department of Mechanical Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, The Florida Staté University FAMU-FSU College of Engineering, 1-178 p.
- O'CONNOR BSC, A. S. (2010). The Feasibility of Grid Connected Solar Dish Stirling Generators within the South West Interconnected System of Western Australia. Murdoch University School of Energy and Engineering, 1-178 p.
- PITZ, R. P. (2007). High Temperature Solar Concentrators. *Solar Energy Conversion and Photoenergy Systems*. vol 1, pp. 1-47.

- PLASENCIA S, E., MATOS C, L., POSADAS, A., & CABRERA, C. (2007). Estimación horaria de la irradiancia solar total extratérrestre. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, vol. 10, pp. 72-77.
- POULLIKKAS, A., KOURTIS, G., & HADJIPASCHALIS, I. (9 de December de 2010). Parametric analysis for the installation of solar dish technologies in Mediterranean regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2772-2783 p.
- QUIROGA, M. R. (2009). *Guía metodológica paradesarrollar indicadores ambientalesy de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe*. Santiago, Chile: Copyright © Naciones Unidas, 1-129 p.
- RABL, A. (June de 1978). Optical and Thermal Analysis of Colectors. *Paper presented at Solar Thermal Concentrating Collector Technology Syposium*, 1-129 p.
- RAMIRES, C. A. (1989). *Construcción e instalación de un concentrador solar tipo canal parabolica*. Seminario de proyectos, Universidad autonoma metropolitana unidad iztapalapa.
- RICHTER, C., TESKE, S., & SHORT, R. (2009). *Energía Solar Térmica de concentración, Perspectiva Mundial 2009*. España: Greenpeace Internacional, SolarPACES, 1-88 p.
- SÁNCHEZ S, N. (2003). *Optimización de Máquinas Térmicas*. Tesis de Doctor en Ciencias Físicas., Universidad de Salamanca, Departamento de Física Aplicada, 1-134 p.
- SANDIA, R. (2001). *Solar Thermal Utility-Scale Joint Venture Program (USJVP) Final Report*. New Mexico and California, 1-352 p.
- SARGENT, & LUNDY. (2003). Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts. *National Renewable Energy Laboratory*, 1-344 p.
- SHALTENS, R., & SCHREIBER, J. (6-11 de Agost de 1989). Comparison of conceptual designs for 25 kWe advanced Stirling conversion systems for dish electric applications. *Energy Conversion Engineering Conference, 1989. IECEC-89., Proceedings of the 24th Intersociet.,vol 5*, pp. 2305 -2315.
- SILVA, P. M. (2004). *Sistemas termo solares de concentración*. Aprovechamiento de la energía solar en media y alta temperatura. Departamento de ingeniería Energética y Mecánica de los fluidos.

- STEINFELD, A., & PALUMBO, R. (2001). Solar Thermochemical Process Tecnology. (R. A. Meyers, Ed.) *ENCYCLOPEDIA OF PHYSICAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, vol 15, pp 237-256.
- STINE, W. B., & DIVER, R. B. (1994). *A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology*. California: Sandia National Laboratories, pp. 1-124.
- STONE, K., BRAUN, H., MOORE, M., & CLARK, T. (1997). Stirling Energy Systems' (SES) Dish-Stirling Program, 1039-1044 p.
- THEOCHARIS, T., VASILIS, G., & KATÉRINA, M. (24 de July de 2003). Technical and economical evaluation of solar. *Renewable Energy*, vol 28, pp. 873-886.
- TRIEB, F., LANGNIB, O., & KLAIB, H. (Novembre de 1994). SolarElectricity generation— A comparative view of technologies, costs and environmental impact. *Solar Energy*, vol 59, pp. 89-99.
- VALCHER MARIA E. (7 deJulho de 2010). Analysis and modeling of a thermo solar plant. Università Degli Studi Di Padova. 1-150 p.
- WAKIN, B. R. (2005). *Avaliação Teórica e Experimental do MotorStirling Modelo SOLO 161 Operando com Diferentes Combustíveis*. Título de Mestre em Engenharia Mecânica., Universidad Federal de Itajubá, Engenharia Mecânica, Itajubá, 1-164 p.
- WILKE, H., & SILVA, L. (2004). Desenvolvimento de um módulo combustor biomassa-motor stirling aplicado a sistemas de geração isolada e baseados em gerador de indução. *Agroenergia; UNICAMP*, 1-10 p.
- WUA, S. Y., XIAO, L., CAO, Y., & LI, Y.-R. (27 de August de 2009). A parabolic dish/AMTEC solar thermal power system and its performance evaluation. *Applied Energy*, 452-462 p.
- ZANGANEH, G., BADER, R., PEDRETTI, A., M, P., & A, S. (2010). A solar dish concentrator based on ellipsoidal polyester membrane facets. *Solar Energy*, 40-48 p.

ANEXO

Publicações realizadas pelo autor

EVENTOS INTERNACIONAIS

Mendoza. L. S. C.; Lora E. E. S.; Cobas V. M.; Guillen G. R.; Almazan. O.; “MODELING GENERATION SYSTEMS FROM USING SOLAR STIRLING ENGINES PARABOLIC DISHES (SOLAR /DISH)” Word Renewable Energy Forum, Denver-Colorado, WREF- SOLAR 2012. Estado do artigo: Aprovado

ABSTRACT

For the first time a model structured according (Duffie J. and Beckman W., 1980), (Gaven H. and Bannerot R. 1984), (Kongtragool, B. and Wongwises S., 2005), is presented, that describes the behavior of an electric power generation system, based on a solar energy technology using a Dish/Stirling system coupled to an electric generator. The first part of the model determines the characteristic of the earth movement related to the Sun, obtaining the follow-up angles to maximize the temperature in the receiver at any geographical location. The efficiencies for every stage of the system were also calculated, based on the reports of the Meteorological Station of the University Itajubá-Brazil.

Also, using the model, the optical-geometric variables were calculated, which allows optimizing the behavior of the system for any geometric dimensions and types of materials of the collector/receiver. In addition, the model gives the heat balance calculation evaluating the efficiencies of the manifold, the receiver, the Stirling motor and the whole system.

Using MATLAB a simulation was done and the results validated by specialized publications. For a collector of 7,5 m of diameter, having a constant radiation of 1000 W/m², the optimum temperature for the higher efficiency of the system (67%), was 1551 K. For the maximum power condition, the model shows that the temperature must be 1664 K, but with an overall efficiency of only 26 %.

Keywords: *Solar Energy, Solar Collector, Stirling Engine, Maximum Power, Maximum Efficiency, Energy Conversion.*

EVENTOS NACIONAIS

Mendoza. L. S. C.; Lora E. E. S.; Cobas V. M; Guillen G. R; “MODELACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE ENERGÍA SOLAR UTILIZANDO DISCOS PARABÓLICOS Y MOTOR STIRLING, PARA LA CIUDAD DE ITAJUBÁ.”. VII congresso Nacional de Engenharia Mecânica CONEM, São Luís de Maranhão- Brasil 2012. Estado do artigo: Aprovado. CODIGO DO RESUMO “CONEM2012-0373”

RESUMEN

El artículo presenta un modelo integrado para el análisis del comportamiento de un sistema de generación de energía eléctrica a partir de la radiación solar, utilizando la tecnología Disco/Stirling. En primer lugar, se determinaron las características del movimiento de la tierra con respecto al sol, que permite calcular los ángulos de seguimiento solar para maximizar la irradiación en el receptor, así como calcular el tiempo de insolación en un día. El modelo opto-geométrico se elaboró para posibilitar el análisis del comportamiento del sistema para diferentes dimensiones geométricas Colector/Receptor. El balance térmico se realizó a partir de parámetros climáticos reales (Velocidad del viento, temperatura ambiente e irradiación solar), suministrados por la estación meteorológica de la Universidad Federal de Itajubá (UNIFEI-BRASIL). Finalmente, se acoplan los modelos para calcular las eficiencias del colector, receptor, motor Stirling y el sistema global, además de establecer la potencia eléctrica que es posible alcanzar en un día típico del año.

La herramienta matemática utilizada fue el MATLAB y los resultados fueron validados en base a resultados publicados en la literatura especializada. El trabajo muestra, además, el comportamiento global de las eficiencias, demostrando que las pérdidas críticas de este sistema corresponden al proceso de transferencia de calor entre el receptor y el motor Stirling. Todo tomando como Caso de Estudio la operación del sistema Disco/Stirling para las condiciones meteorológicas de la ciudad de Itajubá en Minas Gerais.

Palabras claves: Irradiación solar, Motor Stirling, Colector solar, Geometría solar, Balance térmico.

ENVIADO PARA PUBLICAÇÃO EM CONGRESSO INTERNACIONAL

Mendoza. L. S. C.; Vidal. J. R.; Lora E. E. S.; Cobas V. M; “MODELACIÓN DE UN SISTEMA DISH/STIRLING PARA LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA” III Congresso Argentino de Engenharia Mecânica. III CAIM 2012. Estado do artigo: Aprovado o Artigo.

RESUMEN

Este artículo presenta un modelo estructurado que analiza el comportamiento de un sistema solar de generación de energía eléctrica, utilizando la tecnología Disco/Stirling. En la primera etapa de este trabajo se determina el movimiento característico de la tierra con respecto al sol, que permite calcular los ángulos de seguimiento solar para maximizar la irradiación en el receptor y calcular el tiempo de duración solar en un día. El modelo opto-geométrico es realizado con el propósito de diseñar y analizar el comportamiento del sistema para diferentes dimensiones geométricas Colector/Receptor. El cálculo del balance térmico es determinado a partir de parámetros climáticos reales como (Velocidad del viento, temperatura ambiente e irradiación solar), suministrados por la estación meteorológica de la Universidad Federal de Itajubá (UNIFEI-BRASIL). En la segunda etapa del trabajo es desarrollado un modelo matemático para el motor Stirling que incluye los intercambiadores de calor (caliente, frío y regenerador) integrados a un modelo adiabático de segunda orden considerando las pérdidas por caída de presión, histéresis, shuttle, pérdidas internas y pérdidas externas.

Finalmente se acoplan los modelos para calcular las eficiencias del colector, receptor, motor Stirling y el sistema global, además de representar la potencia eléctrica para un día tipo durante el año. La herramienta matemática utilizada fue MATLAB y los resultados fueron validados con base a resultados publicados en la literatura especializada. Además este trabajo muestra al final el comportamiento global de las eficiencias demostrando que las pérdidas críticas de este sistema se encuentran en la transferencia de calor entre el receptor y el motor Stirling.

Palabras claves: Irradiación solar, Motor Stirling, Colector solar, Geometría solar, Balance térmico.