

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

MODELO OPTO-GEOMÉTRICO PARA A GERAÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA E ANÁLISE DOS INDICADORES TECNOLÓGICOS DO SISTEMA DISCO/STIRLING

CON-2016-1609

¹Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG, 37500-903

²CPFL Energy, Rodovia Campinas-Mogi Mirim, 1755, CEP: 13088-900 - Campinas

Resumo: Este trabalho apresenta um modelo matemático que analisa o desempenho de um sistema de geração de energia elétrica a partir da irradiação solar, determinando os ângulos de rastreamento do sol que permitem maximizar a temperatura no receptor. O modelo opto-geométrico permite uma análise de sensibilidade para otimizar o desempenho da tecnologia mediante a variação das dimensões geométricas como: superfície do coletor, ângulo de borda, concentração geométrica, tipo de materiais etc. Finalmente, é realizado o balanço térmico, que permite avaliar o sistema global. Os resultados obtidos para uma irradiação solar de 1000 W/m² e diâmetros entre 1,8 a 17 m do espelho coletor, foram potências elétricas na faixa de 0,6 e 68 kW e eficiências dos sistemas entre 22 até 31%. Além disso, apresenta indicadores tecnológicos das diferentes tipologias geométricas dos sistemas Disco/Stirling, que servem como ferramenta para a valoração objetiva do comportamento térmico, determinando critérios de comparação que facilitem uma análise comparativa das vantagens e desvantagens no âmbito técnico

Palavras-chave: Disco/Stirling, eficiência do sistema, indicadores tecnológicos, irradiação solar, potência elétrica.

Nomenclatura

a	Curvatura da parábola	1/m
A _a	Área de abertura do coletor	m ²
A _r	Área do receptor	m ²
C _h	Altura de projeção do receptor	m
C _{max}	Concentração máxima	-
d _f	Distância a partir do foco	m
D _p	Diâmetro da parábola	m
D _r	Diâmetro do receptor	m
E	Equação do tempo	min
f	Foco	m
f _s	Fator da área não sombreada	%
F	Erro de dispersão	-
G _b	Irradiação solar direta	W/m ²
h _c	Coefficiente de convecção	W/m ² K
h	Altura da parábola	m
HSV	Hora solar verdadeira	min
h _{sol_verd}	Minutos	min
h _l	Hora local	min
m _{con}	Meridiano convencional	°
m _{loc}	Meridiano local	°
m _{sol_verd}	Minutos	min
n	Dia do ano (Entre 1 y 365)	
S	Comprimento da parábola	m
S _{solverd}	Tempo	min
¹ T _{amb}	Temperatura ambiente	K

T _r	Temperatura do receptor,	K
T _a	Temperatura ambiente	K
X	1 h em verão	h

Símbolos gregos

ρ	Refletância do coletor	-
τ _{abs}	Transmitância da superfície absorvedora -	
α _{abs}	Absorbância do absorvedor	-
γ _G	Fator de configuração geometria	-
α	Ângulo Solar	°
cos θ _i	Fator de seguimento	
ω	Ângulo horário	°
θ _{zs}	Ângulo Zênite	°
γ _s	Ângulo Solar	°
φ	Latitude	
δ	Ângulo de declinação solar	°
φ _{int}	Fator de intercepção	-
φ _r	Ângulo de borde	°
δ _{disp}	Ângulo de dispersão	°
ε	Emissividade do absorvedor	-
σ	Constante Stefan-Boltzmann, W/m ² K ⁴	
η _c	Eficiência do coletor	%
η _{IT}	Eficiência do motor Stirling	%
η _{rec}	Eficiência do receptor	%
η _o	Eficiência óptica	%
η _{c,inst}	Eficiência instantânea	%
η _{gen}	Eficiência do gerador	

1. INTRODUÇÃO

A intensificação dos problemas ambientais tem levado a um debate sobre a disponibilidade e uso da energia, onde a preocupação não é apenas o esgotamento dos recursos fósseis e as medidas preventivas para combater o efeito estufa, mas também o interesse da comunidade científica em desenvolver fontes de energia sustentáveis, a partir de fontes de energia renováveis. Neste aspecto destacam-se fatores importantes (Council, 1993) como: alcançar preços adequados que permitam ser competitivo no mercado, ter disponibilidade de energia elétrica de forma contínua e que a fonte renovável seja realmente sustentável.

A tecnologia térmica solar está avançando continuamente, provando ter um grande potencial com baixo impacto ambiental. As usinas termo solares é caracterizado por diferentes configurações geométricas como os sistemas Disco/Stirling, Fresnel, coletores cilíndrico-parabólicos, torres centrais, etc. Estes sistemas estão compostos por três elementos principais como: concentrador, controle de rastreamento solar, unidade de conversão de energia. Entre as tecnologias solares, o Disco/Stirling têm os maiores valores de eficiência na conversão de energia solar em eletricidade (27-31%). Este sistema tem um motor Stirling que funciona com energia térmica procede de combustíveis fósseis e renováveis (Biomassa, Solar, Biocombustíveis, etc.) (Baumüller e Schiel, 1997; Demeo, e J. Galdo 1997).

O trabalho faz uma análise do comportamento da tecnologia Disco/Stirling, a ser instalado em um sistema híbrido Solar/Biomassa no laboratório solar térmico da UNIFEI. Para estudar o comportamento do sistema Disco/Stirling foi elaborado um modelo matemático que. Considera as alterações de temperatura, velocidade do vento e da irradiação solar, além do tipo de material utilizado no Coletor/Receptor.

Este trabalho faz parte de um projeto que está em andamento, e é executado pela UNIFEI dentro do programa P&D Aneel, identificado como: PD-0063-0041/201, que foi apoiado parcialmente pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Companhia Paulista de Força e Luz, Paulista, RGE e Piratininga, (CPFL Energia), Coordenação de Aperfeiçoamento do Ensino Superior (CAPES), também à fundação de Apoio da Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por sua colaboração no desenvolvimento e financiamento deste trabalho e a Agência Reguladora de Energia Elétrica do Brasil ANEEL, Empresa de Energia para o financiamento do Sistema Híbrido Solar/ Biomassa - SHSB.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Os sistemas Disco/Stirling são compostos por uma superfície côncava coberta de um material de alta refletividade, encarregada de direcionar a radiação solar para um receptor localizado no ponto focal do concentrador, com a finalidade de alcançar temperaturas elevadas, permitindo uma elevada eficiência de conversão de calor em energia elétrica.

A irradiação solar é absorvida no receptor, aquecendo o fluido de trabalho do motor Stirling, neste caso o hidrogênio, que funciona no intervalo de temperatura de 650 a 750 °C, responsável por transmitir a energia absorvida ao motor Stirling para a conversão de energia térmica em energia mecânica, que finalmente é transformada em energia elétrica através de um gerador elétrico Nepveu *et al.* (2009). Para maximizar a energia no receptor é necessário considerar os seguintes aspectos como: tipo de material do Coletor /Receptor, controle de seguimento solar e geometria do Sistema.

3. MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático é desenvolvido em três etapas. A primeira descreve o movimento relativo do sol, a fim de calcular os ângulos de seguimento e o tempo de insolação disponível durante um dia para a cidade de Itajubá MG, Brasil. A segunda, formula o dimensionamento opto-geométrico do coletor /receptor, com a finalidade de maximizar a quantidade de energia térmica no receptor. A terceira etapa mostra o cálculo das eficiências do sistema de acordo com as configurações feitas no modelo geométrico tendo como propósito maximizar a potência elétrica.

A. 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) são descritas na tabela 1 e tomadas de Duffie e Beckman (1980).

Tabela 1. Fórmulas matemáticas utilizadas para determinar a relação trigonométrica entre a posição do Sol e a Terra.

Hora solar verdadeira	$HSV = h_l - X + E + 4(m_{con} - m_{loc})[min]$	(1)
Ângulo horário	$\omega = h_{sol_verd} \frac{360}{24} + m_{sol_verd} \frac{15}{60} + S_{sol_verd} \frac{1}{240}$	(2)
Ângulo Zenith	$\cos(\theta_{zs}) = \cos(\delta) * \cos(\phi) * \cos(\omega) + \sin(\delta) * \sin(\phi)$	(3)
Ângulo Solar	$\sin(\gamma_s) = \sin(\delta) * \sin(\phi) + \cos(\omega) * \cos(\delta) * \cos(\phi)$	(4)
Insolação solar	$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi * \tan \delta)$	(5)

A Tabela 2 apresenta os resultados da variação dos ângulos geométricos, que descrevem o movimento aparente do sol durante dia 15 de janeiro e para três horas diferentes (9 h: 30 min, 11 h 45 min e 15 h: 15 min.). O objetivo destes cálculos é a obtenção de informações a partir da variação do ângulo de incidência solar sobre o disco refletor, situado na cidade de Itajubá, que serve como base para o projeto do sistema de controle de seguimento solar.

Tabela 2. Resultados do modelo de variação do movimento aparente do Sol ângulos geométricos.

LOCALIZAÇÃO	ITAJUBÁ		
Dados de entrada			
Hora Civil [min]	9 h:30	11 h:45	15 h:15
Dados de saída			
Verão ou inverno	1 h	1 h	1 h
Hora Solar [min]	8 h:23	10 h:38	14 h 08
Equação do tempo [min]*	-8.633	-8.633	-8.633
Efeito dos minutos*	1.8	1.8	1.8
Altura solar	39.949°	70.990°	60.291°
Ângulo horário	-54.208°	-20.458°	32.041°
Ângulo Azimutal	80.4112°	89.5307°	86.0236°
Ângulo de incidência	50.050°	19.009°	29.708°

* Correção do efeito dos minutos, devido à posição geográfica da cidade de Itajubá em relação ao meridiano de fuso horário padrão.

Ao final da simulação também foram calculados outros parâmetros de importância como hora da saída e pôr do sol para o mesmo dia (06h23min a.m. – 19h36min p.m.), assim como o tempo de insolação solar durante o dia, para este dia foi 13h13min de duração solar.

B. Modelagem geométrica do sistema Coletor/Receptor

O cálculo das distâncias equivalentes da geometria do coletor/receptor está determinado a fim de maximizar a energia solar na cavidade do receptor, já que um projeto bem elaborado da geometria origina uma boa interceptação da luz solar. A figura 1 mostra os parâmetros calculados como: interceptação geométrica; concentração geométrica, fator de configuração geométrica, etc. Cada coletor tem formas e dimensões diferentes de acordo com as necessidades requeridas de potência elétrica.

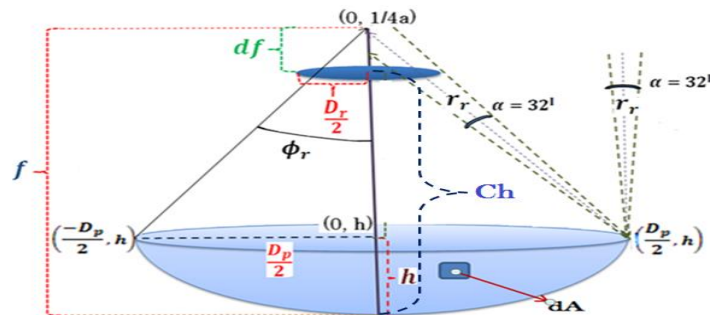


Figura 1. Distâncias equivalentes no parabolóide adaptado de (Jaramillo S, 1998)

As principais equações utilizadas para dimensionar e projetar o sistema coletor/receptor é apresentado na tabela 3.

Tabela 3 Fórmulas matemáticas utilizadas no modelo geométrico

Diâmetro do receptor (Ramires, 1989)	$D_r = \frac{D_p \sin(0,267^\circ)}{\sin \phi_r \cos(\phi_r + 0,267^\circ)}$	(6)
Distância focal (Ramires, 1989)	$f = \frac{D_p}{4 \tan(\frac{\phi_r}{2})}$	(7)
Ângulo de borda (Ramires, 1989)	$\phi_r = \tan^{-1} \left(\frac{8f/D_p}{16*(f/D_p)^2 - 1} \right)$	(8)
Altura da parábola (Gual Esteve, 2009)	$h = \frac{1}{4f} * \frac{D_p^2}{4}$	(9)

Já determinados geometricamente os parâmetros do Coletor/Receptor, se projeta a nova localização do receptor C_h . O deslocamento da posição do receptor do ponto focal é realizado a fim de prevenir a fadiga do material sobre a

superfície do receptor, causada pela irradiação solar refletida concentrada num único ponto. A equação (10) representa o cálculo da distância ótima em função do diâmetro do coletor e receptor, Guven e Bannerot, (1984).

$$C_h = f - \left(f - \frac{1}{4f} \frac{D_p^2}{4} \right) \frac{D_r}{D_p} - \frac{1}{4f} \frac{D_p^2}{4} \quad (10)$$

Calculada a distância que deve ter o coletor ao receptor C_h , é estabelecida a variação percentual dos raios do sol que impactam ao receptor se o coletor estiver inclinado a determinado ângulo γ' em relação ao sol, Gual, (2009). A figura 2 mostra o deslocamento da irradiação solar que atinge a superfície do receptor, definida como $d\Delta$.

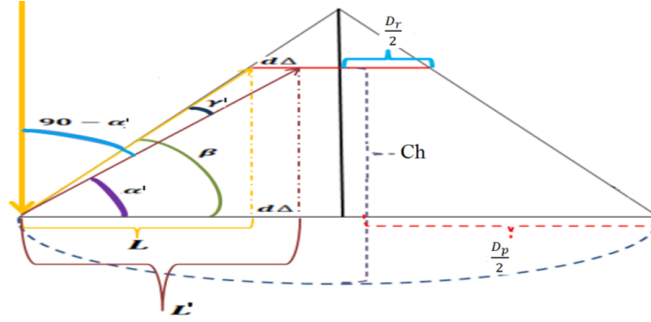


Figura 2. Variação do ângulo de desvio da irradiação solar.

Os ângulos envolvidos nos cálculos de desvio do feixe da irradiação solar podem ser representados da seguinte forma, colocando β em função do foco, diâmetro do coletor e receptor fica da seguinte maneira:

$$\beta' = \tan^{-1} \left(\frac{f - \left(f - \frac{1}{4f} \frac{D_p^2}{4} \right) \frac{D_r}{D_p} - \frac{1}{4f} \frac{D_p^2}{4}}{\frac{D_p}{2} - \frac{D_r}{2}} \right) \quad (11)$$

Observa-se que na figura 3, α' é definida como a diferença entre β e γ' :

$$\alpha' = \tan^{-1} \left(\frac{f - \left(f - \frac{1}{4f} \frac{D_p^2}{4} \right) \frac{D_r}{D_p} - \frac{1}{4f} \frac{D_p^2}{4}}{\frac{D_p}{2} - \frac{D_r}{2}} \right) - \gamma' \quad (12)$$

Definindo L como a componente projetada da irradiação solar:

$$L = C_h * \tan(90 - \alpha') \quad (13)$$

E substituindo o ângulo α' na equação (14):

$$L = C_h \tan \left(90 - \tan^{-1} \left(\frac{f - \left(f - \frac{1}{4f} \frac{D_p^2}{4} \right) \frac{D_r}{D_p} - \frac{1}{4f} \frac{D_p^2}{4}}{\frac{D_p}{2} - \frac{D_r}{2}} \right) - \gamma' \right) \quad (14)$$

A variação de deslocamento da irradiação solar na superfície do receptor $d\Delta$ é:

$$d\Delta = L - \left(\frac{D_p}{2} - \frac{D_r}{2} \right) \quad (15)$$

➤ Comprimento de uma parábola

Alguns parâmetros geométricos do paraboloide de revolução são necessários para a projeção do sistema. Ao considerar a função da parábola e sua derivada contínua no intervalo $[(-D_p/2), (D_p/2)]$, o comprimento do arco da curva da parábola $Y^2 = 4f * Z$. O cálculo do comprimento do arco de uma parábola pode ser realizado por meio da integração de uma área diferencial da curva, o resultado é apresentado na equação (16), Guven e Bannerot, (1984).

$$S = \left[\frac{D_p}{2} \sqrt{\left(\left(\frac{4h}{D_p} \right)^2 + 1 \right)} \right] + 2f \ln \left[\frac{4h}{D_p} + \sqrt{\left(\left(\frac{4h}{D_p} \right)^2 + 1 \right)} \right] \quad (16)$$

➤ Concentração máxima

A concentração geométrica é definida como a relação entre a área da abertura do paraboloide de revolução e a área de captação de irradiação solar que se encontra na cavidade do receptor. Embora para calcular a concentração máxima, foram tidos em conta os efeitos mostrados na figura 3, como o ângulo α que representa o ângulo que os raios solares apresentam entre si, adota-se o valor de $\alpha = 32^\circ$, isto ocorre porque os feixes de luz provenientes do sol não incidem exatamente paralelos entre si, como consequência os raios refletidos não convergem num ponto, mas sim numa região Guven e Bannerot, (1984).

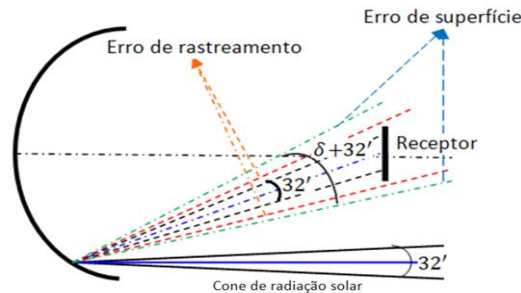


Figura 3. Fatores que afetam a concentração solar Batista, (2007)

Também depende do fator denominado ângulo de dispersão δ_{disp} que permite considerar os erros angulares associados com um seguimento solar inadequado, rugosidade inerente à superfície refletora e erros do contorno formados na superfície da curvatura do disco, Howard e Harley, (2009) e finalmente do ângulo de borda Φ_r é o único parâmetro da geometria do concentrador que está envolvido. Considerando que a intersecção da irradiação especular refletida está num cone angular com $32' + \delta$, então, a concentração máxima, Kandilli e Ulgen, (2007), definida como:

$$C_{max} = \left(\frac{\sin \phi_r \cos \left(\phi_r + \frac{\alpha + \delta_{disp}}{2} \right)}{\sin \left(\frac{\alpha + \delta_{disp}}{2} \right)} \right)^2 \quad (17)$$

O índice de concentração máxima é limitado por fatores, tais como absorvidade e refletividade Batista, (2007).

$$C_{max,Real} = C_{max} * \alpha_{abs} * \rho \quad (18)$$

A Figura 4 mostra a variação da concentração solar com respeito ao ângulo da borda, o máximo de eficiência é obtido para um ângulo de borda de 45° . A concentração solar diminuiu devido às perdas de dispersão, perdas por degradação do espelho, etc. Jaramillo, (1998).

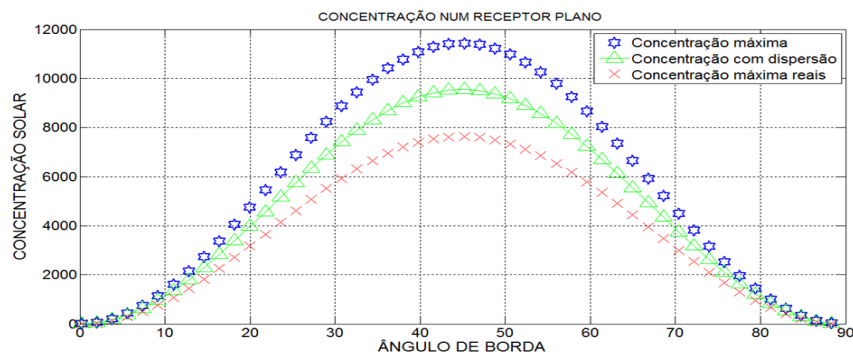


Figura 4. Variação da concentração solar.

- ✓ 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.

A tabela 4 mostra os resultados mais importantes do modelo geométrico, incluindo três tipos de indicadores: concentração geométrica, concentração proposta pela projeção geométrica e concentração geométrica real. A concentração geométrica depende da distribuição angular da radiação solar e do ângulo de borda, atingindo valores de 46.189 sóis, para coletores parabólicos Plasencia et al. (2007). A concentração de projeto foi determinada para as condições de trabalho encontradas na literatura científica e a concentração real é limitada pelo tipo de material e pelas dimensões do Coletor/Receptor.

Tabela 4. Resultados do modelo de opto geométrico

Diâmetro do coletor [m]	6.5	7.3	7.5	10.57	17
Superfície do coletor [m²]	33,18	41,85	44,17	87,74	226,98
Ângulo de borda [rad]	0,789	0,789	0,789	0,789	0,789
Foco geométrico [m]	3,9	4,38	4,5	6,34	10,20
Foco de projeto 1 [m] Ch1	3,813	4,29	4,41	6,24	10,05
Concentração geométrica	9544	9544	9544	9544	9544
Concentração de projeto	1400	1800	1800	2800	3400
Concentração real	1263	1624	1624	2526	3068
Diâmetro do receptor [m]	0,173	0,173	0,177	0,199	0,291
Superfície do receptor [m²]	0,023	0,023	0,025	0,031	0,066

C. Eficiências do sistema Disco /Stirling

As eficiências do sistema Disco/Stirling estão definidas pela eficiência óptica do coletor, a eficiência térmica do receptor e a eficiência do motor-gerador. Para determinar a eficiência óptica é preciso calcular o fator de sombreamento e fator de configuração geométrica.

➤ Fator de sombreamento e configuração geométrica

As perdas pelo fator de sombreamento são produzidas pela configuração geométrica com uma estrutura que suporta o motor/receptor, reduzindo a área efetiva do espelho refletor que fornece a irradiação solar ao receptor. O f_s e γ_G são calculados com a equação (19) dada pelo Jaramillo, (1998):

$$f_s * \gamma_G = \frac{(\sin^2 \phi_r - \sin^2 \phi_{\min})}{4 * \tan^2 \left(\frac{\phi_r}{2} \right)} \quad (19)$$

Este fator $f_s * \gamma_G$ depende da variação do ângulo da borda e do efeito da sombra que origina o receptor no coletor, representado pelos ângulos ($\Phi_{\min}=0^\circ$, $\Phi_{\min}=5^\circ$, $\Phi_{\min}=10^\circ$). Na Figura 5, observa-se a diminuição do fator $f_s * \gamma_G$ 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, (1998).

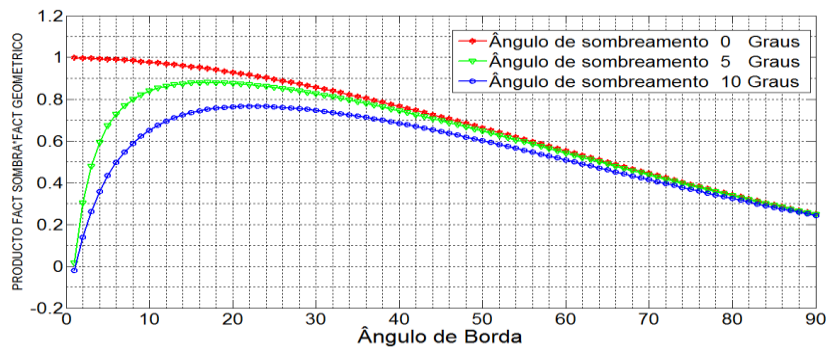


Figura 5. Comportamento do fator $f_s * \gamma_G$ em função do ângulo de borda, Jaramillo, (1998).

➤ Eficiência instantânea do coletor

Para determinar a eficiência instantânea é preciso calcular a eficiência óptica que está definida como a razão entre a radiação que intercepta a superfície do absorvedor e a radiação incidente na área do coletor. O desempenho depende das propriedades dos materiais presentes, da geometria do coletor e das imperfeições do processo de fabricação. A eficiência óptica está definida pela equação:

$$\eta_o = [f_s * \rho * \gamma_G * \cos \theta_i] * \tau_{abs} * \alpha_{abs} * F \quad (20)$$

A eficiência instantânea do coletor é definida como:

$$\eta_{c,inst} = \eta_o - \frac{Q_{perd}}{A_a * G_b} \quad (21)$$

Da equação (21) pode-se concluir que para melhorar a eficiência do coletor, deve ser melhorada a eficiência óptica,

diminuir as perdas de calor e aumentar a concentração. Os sistemas solares de alta concentração são sensíveis às propriedades ópticas Wua et al. (2007).

➤ *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 Wua et al. (2007). A eficiência do coletor está definida como:

$$\eta_c = f_s (\cos\theta_i) \rho \phi_{int} \quad (22)$$

➤ *Eficiência do receptor*

A eficiência do receptor pode ser calculada a partir da expressão mostrada na equação 23, onde se tem em conta as condições meteorológicas reais como: a velocidade do vento temperatura ambiente e a irradiação solar diária.

$$\eta_{rec} = \frac{G_b * A_r * C_{Geom} - \sigma \epsilon A_r (T_r^4 - T_{amb}^4) - h_c A_r (T_r - T_{amb})}{G_b * A_a} \quad (23)$$

A figura 6 mostra a variação da eficiência do receptor e global em função do diâmetro do coletor onde é observado que diâmetros maiores a 4,5 m os valores de eficiência entre 88% e 90%. Isto é devido ao aumento da área do espelho coletor, que aumenta o calor concentrado na cavidade do receptor.

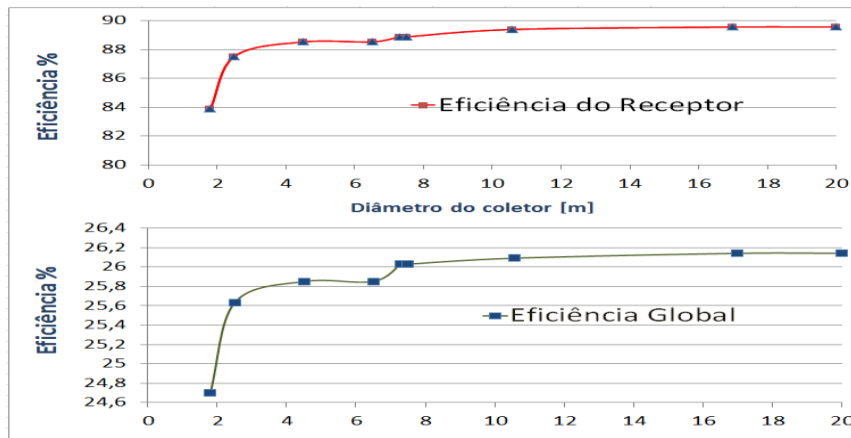


Figura 6. Influência do diâmetro de abertura do coletor sobre as eficiências do receptor e a eficiência global.

A eficiência global do sistema (Disco/Stirling) é calculada usando a equação (24), onde a eficiência do motor Stirling está limitada pela constante tecnológica de $K_s=0,55$, Banha e Somchai, (2005). Onde a eficiência está entre 32%- 36% e a eficiência do gerador de $\eta_{gen}=92\%$.

$$\eta_{sistema} = \eta_c * \eta_{rec} * \eta_{IT} * \eta_{gen} \quad (24)$$

A potência dos motores Stirling está limitada pelo desenvolvimento tecnológico, pelos tipos de materiais dos elementos para suportar as altas temperaturas que atingem o receptor, pela configuração geométrica para aproveitar a máxima irradiação solar, etc. A figura 7 apresenta a variação da potência elétrica em função da área do coletor.

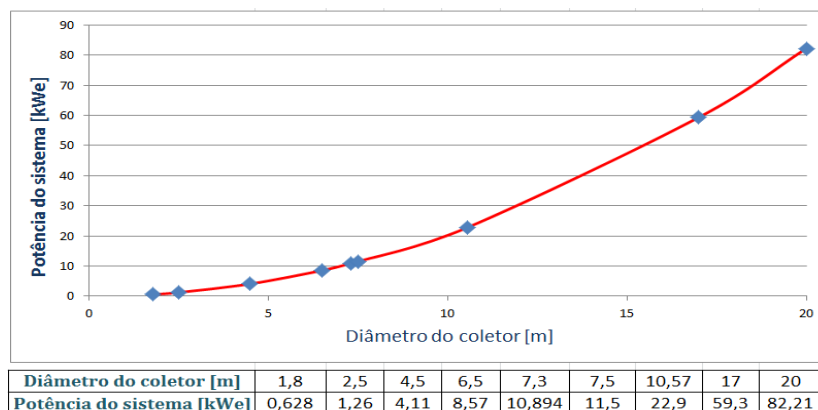


Figura 7. Influência do diâmetro de abertura do coletor sobre as eficiências do receptor e global.

4. INDICADORES TECNOLÓGICOS

Um indicador refere-se à quantidade ou magnitude de um conjunto de parâmetros, que permite localizar ou classificar as unidades de análise em relação ao conceito ou conjunto de variáveis que está sendo analisado Quiroga, (2009). Os indicadores deste trabalho são estabelecidos com a finalidade de fornecer informações sobre os critérios de projeto e as prioridades no desenvolvimento tecnológico. Para realizar esta análise, foi considerada uma irradiação solar de 1000 W/m^2 , 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, geração de energia elétrica por unidade de área do coletor, geração térmica por unidade de área do receptor, capacidade de geração térmica em função da capacidade de geração de eletricidade, distribuição das eficiências em cada estágio do sistema solar.

A. Concentração Geométrica

A concentração solar é definida como o fluxo solar médio que passa através da abertura do receptor dividida pela irradiação solar direta normal, (maior concentração solar conduz a uma maior temperatura de operação e por tanto maior eficiência térmica). A figura 8 mostra o indicador de concentração solar, representada pela razão da área do coletor sobre a área do receptor. Nestes casos observa-se que para diferentes tecnologias Disco/Stirling o fato de ter uma maior área do coletor, não implica ter uma maior concentração geométrica.

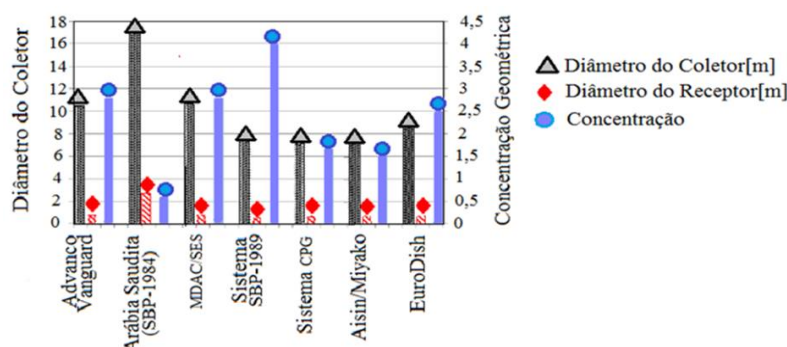


Figura 8. Relação de concentração

O sistema “SBP” instalado na Arábia Saudita em 1984 é a tecnologia com maiores dimensões no diâmetro do coletor e do receptor, devido ao seu alto potencial de geração de eletricidade, mas tem uma baixa relação de concentração geométrica com respeito a outras tecnologias.

B. Potência elétrica específica.

O indicador de densidade de potência elétrica é determinado em função da área total da superfície do coletor e representa a potência elétrica que pode gerar por unidade de área do espelho coletor. É importante ter em conta este indicador, já que representa a eficiência que o sistema tem para aproveitar a quantidade de irradiação solar do espelho coletor e transformá-la em potência elétrica. Existem alguns parâmetros que afetam este indicador tecnológico e não são evidentes, como: 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 óptica, perdas por radiação, convecção e condução. Na figura 9, mostra-se o indicador de potência elétrica específica para 10 tecnologias Disco/Stirling.

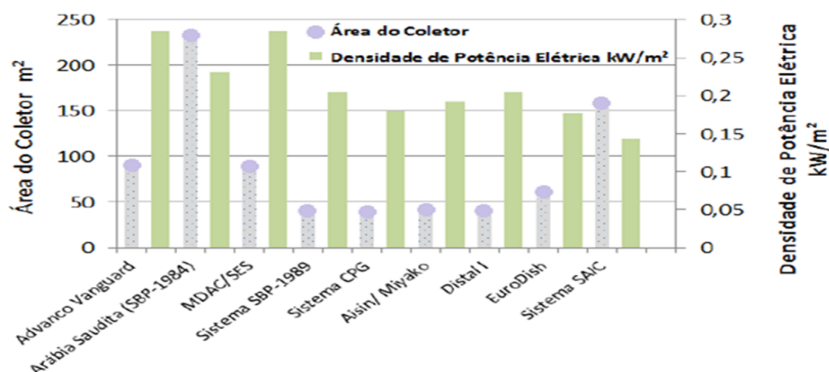


Figura 9. Capacidade de geração de potência elétrica por unidade de área de coletor

- ✓ 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 SBP "Schlaich, Bergermann and Partner" instalado na Arábia Saudita em 1984, apesar de ser o maior sistema de geração de potência elétrica tipo Disco/Stirling, não é o sistema com maior densidade de potência elétrica. Uma razão é que a eficiência óptica do coletor 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".

C. Potência térmica específica

A densidade de potência térmica é a quantidade de potência gerada por unidade de área. O indicador de densidade de potência térmica é um aspecto importante a ser considerado quando há limitações de espaço. O indicador apresenta um parâmetro que ser modificado para obter maior potência de saída possível.

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.

O indicador de potência térmica apresentado é determinado em função da área total da superfície da abertura do receptor e representa a quantidade de calor que pode ser gerado na entrada do receptor que é fornecido ao fluido do trabalho do motor Stirling. A figura 10 mostra a potência térmica específica das tecnologias solares por unidade de área m^2 do receptor:

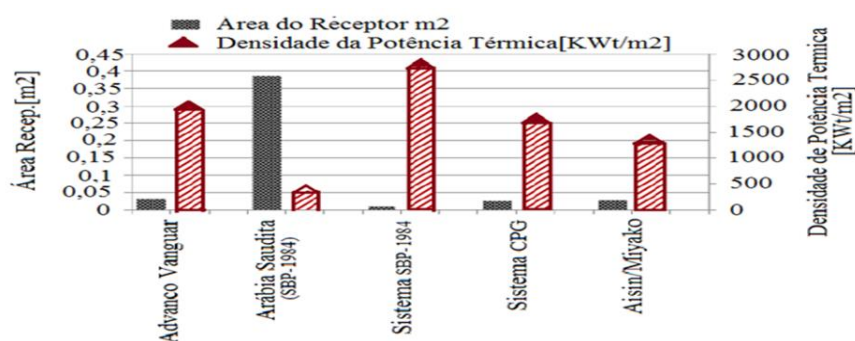


Figura 10. Capacidade de geração de potência térmica por unidade de área do receptor

- ✓ O sistema SBP "Schlaich, Bergermann and Partner" instalado na Arábia Saudita em 1984, fornece a máxima potência térmica no receptor, porém a tecnologia com menor densidade de potência térmica, isto é devido às relações de baixa concentração geométrica, baixa eficiência óptica e térmica.
- ✓ Os aproveitamentos térmicos da maioria dos sistemas estão relacionados com o tipo do receptor, fluido de trabalho, eficiência óptica 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.

D. Eficiências do sistema Disco/Stirling

Para instalações de centrais solares, a produção de eletricidade é limitada por barreiras tecnológicas e altos custos de investimento. Os fatores que influenciam a geração de potência elétrica são as eficiências de cada estágio do sistema.

As eficiências do sistema Disco/Stirling nas diferentes etapas são:

- ✓ Eficiência óptica: Definida pelas propriedades do material de fabricação do espelho coletor (alto coeficiente de reflexão) que tem 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: Definida pela perda de energia devido a processos mecânicos e termodinâmicos como: A compressão e a expansão não são adiabáticas, os trocadores não são ideais porque há perdas de pressão e calor, Losada, (2009).

A figura 11 mostra o comportamento em cada fase do sistema Disco/Stirling na conversão de energia solar em

energia elétrica, com a finalidade de analisar o comportamento geral para cada tecnologia.

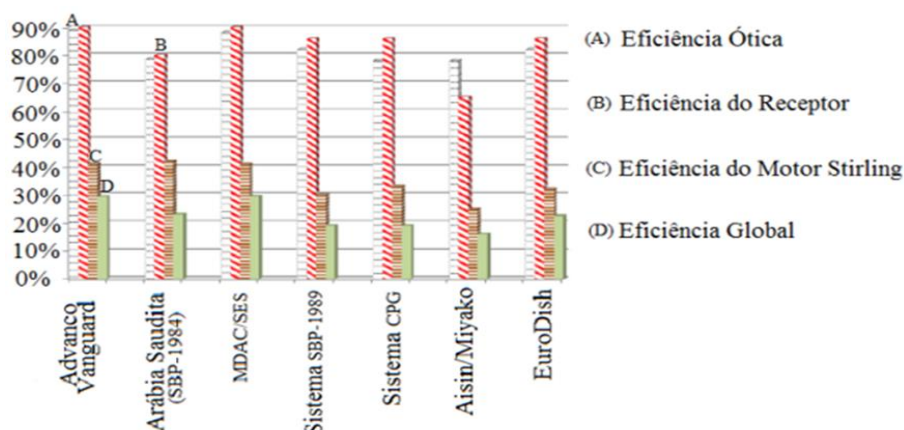


Figura 11. Distribuição da eficiência em todo o sistema

- ✓ 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 Disco/Stirling. As perdas entre a conversão de potência mecânica e energia elétrica são pequenas, isto é devido à eficiência do gerador (94% e 96%) na conversão de energia elétrica.
- ✓ O sistema “SBP” instalado na Arábia Saudita em 1984 possui uma baixa eficiência óptica, o que descompensa o sistema para o momento de aproveitar este recurso energético (Irradiação Solar).
- ✓ Em alguns sistemas, não há perda significativa entre eficiência óptica e a eficiência do receptor.

5. CONCLUSÕES

O artigo apresenta uma metodologia para calcular parâmetros de projeto, sejam geométricos ou térmicos, utilizando as equações propostas neste trabalho.

Foi realizado um modelo matemático para simulação e projeto de um sistema termo solar Disco/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.

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 realização do balanço térmico permitiu comprovar a influência dos seguintes fatores sobre a eficiência do sistema 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 Disco/Stirling entre 23% e 25%.

Através do estudo das distintas tipologias das tecnologias Disco/Stirling na revisão bibliográfica, foi possível determinar indicadores que permitam a comparação entre as mesmas tecnologias, e assim fornecer informações que identifiquem as tecnologias com maior potencial energético.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento do Ensino Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e a Fundação de Apoio da Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por sua colaboração no desenvolvimento e financiamento deste trabalho; também a CPFL Energy e a Agência Reguladora de Energia Elétrica do Brasil ANEEL, Empresa de Energia para o financiamento do Sistema Híbrido Solar/ Biomassa – SHSB.

7. REFERÊNCIAS

Council, W. E, Energy for Tomorrow's World: “The Realities, the Real Options and the Agenda for Achievement”. Relatório técnico. Palgrave Macmillan, 1-25, 1993.

- Baumüller, A. and Schiel, W. "Single acting 10 kW Stirling engine Application and results". Proceedings of the 8. International Stirling Engine Conference, pp. 26.-30, University of Ancona, Italy, 1997.
- Demeo, E. and Galdo, J. "Renewable Energy Technology Characterizations". Washington, D.C.: Electric Power Research Institute; U.S. Department of Energy, pp. 1-283. 1997.
- Nepveu, F. Ferriere, A. and Bataille, F. "Thermal Model of a Disco/Stirling Systems". Solar Energy, vol. 83, pp. 81-89, January, 2009.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. "A. Solar Engineering of Thermal Processes" Vol. Second Edition. Madison, Wisconsin, USA, pp. 1-775, 1980.
- Gual, E. J. "Disseny d'un captador solar d'alta temperatura, amb motor Stirling i disc parabòlic" Trabalho de graduação, Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Enginyeries Industrial i Aeronàutica de Terrassa, 2009.
- Ramires, C. A. "Construcción e instalación de un concentrador solar tipo canal parabólica". Seminario de proyectos, Universidad autonoma metropolitana unidad iztapalapa, 1989.
- Guven, H. M. and Bannerot, R. B. "Optical and thermal analysis of parabolic trough solar collectors for technically less developed countries". Relatório Técnico. University of Houston -University Park, Mechanical Engineering Department -Texas, 1-143 p, 1984.
- Batista, R. L. "Geração de energia elétrica com coletor solar e motor Stirling". Trabalho de graduação, Universidade de São Paulo escola Politécnica, Engenharia Mecânica, São Paulo, 2007.
- D. Howard, and R. G. Harley, "Modeling of Disco-Stirling Solar Thermal Power Generation". Power and Energy Society General Meeting, p. 1-7, July 29, 2009.
- Kandilli, C. and Ulgen, K. "Review and modelling the systems of transmission concentratéd solar energy via optical fibres". Renewable and Sustainable Energy Review, pp. 67-84, 31 de May de 2007.
- Jaramillo, O. A. "Transporte de energia solar concentrada a traves de fibras opticas: Acoplamiento Fibra-Concentrador Estudio Termico". Trabalho de Maestria en Energia Solar, Universidad autonoma de Mexico, Morelia, 1998.
- Plasencia, S. E. and Matos, C. L. and Posadas, A. and Cabrera, C. "Estimación horaria de la irradiancia solar total extraterrestre". Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG, vol. 10, pp. 72-77, 2007.
- Wua, S. Y. Xiao, L. Cao, Y. and Li, Y. R. "A parabolic Disco/AMTEC solar thermal power system and its performance evaluation". Applied Energy, pp. 452-462, 27 de August de 2009.
- Stine, W. B. and Diver, R. B. "A Compendium of Solar Disco/Stirling Technology". California: Sandia National Laboratories, pp. 1-124, 1994.
- Bancha, K. and Somchai, W. "Optimum absorber temperature of a once-reflecting full conical concentrator of a low temperature differential Stirling engine". Renewable Energy. vol 30, pp. 1671-1687, Feb 25, 2005.
- Quiroga, M. R. "Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe". Santiago, Chile: Copyright © Naciones Unidas, 1-129, 2009.
- Ciemat, Sistemas Solares Térmicos de Concentración. Madrid, España: Ciemat, 1-417 p, 2008.
- Losada, J. S. "Análisis de un sistema de disco parabólico con motor Stirling". Trabajo de grado. Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior, 1-114 p, 2009.

8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

"Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho".

THERMAL ANALYSIS OF A DISH STIRLING SYSTEM WORKING WITH A DIR RECEIVER

¹Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG, 37500-903

²CPFL Energy, Rodovia Campinas-Mogi Mirim, 1755, CEP: 13088-900 - Campinas

Abstract. *This paper presents a mathematical model that analyzes the performance of a power generation system from solar irradiation, determining sun tracking angles that allow you to maximize the temperature in the receiver. The opto-geometric model allows a sensitivity analysis to optimize the performance of the technology by varying the geometric dimensions as the surface of the collector, edge angle, geometric concentration, type of material etc. Finally, it held the heat balance, which allows assess the overall system. The results obtained for a solar irradiance of 1000 W / m and diameters from 1.8 to 17 m collector mirror, electric power was in the range of 0.6 to 68 kWe systems and efficiencies between 22 to 31%. Moreover, it presents technological indicators of different types of geometric Disco / Stirling systems, which serve as a tool for objective evaluation of the thermal behavior, determining comparison criteria to facilitate a comparative analysis of the advantages and disadvantages in the technical field*

Keywords: *Dish / Stirling, system efficiency, technological indicators, Solar irradiation, electric power.*