

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM COLETOR SOLAR E MOTOR STIRLING

Lourenço Batista Roxo

lourenco_roxo@yahoo.com.br

O presente trabalho tem como meta o projeto de coletores solares de disco parabólico, os quais, geram energia elétrica a partir de um motor Stirling ligado a um gerador. Tais dispositivos já existem, pelo menos, desde a década de setenta, mas seu uso ainda é pouco amplo. São apresentados conceitos fundamentais ao entendimento dos sistemas de conversão de energia solar em mecânica. Também são expostos métodos para calcular grandezas pertinentes à radiação solar, e desenvolvem-se relações entre os parâmetros geométricos dos coletores (concentradores) e a energia térmica disponibilizada após a concentração. Além disso, o ciclo Stirling é analisado e são expostas equações que dizem respeito aos fluxos de energia neste. Faz-se o projeto do coletor e do receptor, também se obtém o rendimento térmico do motor, com isso, estima-se o rendimento global do dispositivo e a potência elétrica útil, afim de atender uma demanda relativa à eletrificação rural. Este projeto serve como base metodológica para a confecção de uma planilha que generaliza o método de cálculo e permite obter o dimensionamento dos equipamentos em questão para qualquer demanda de potência elétrica, bem como para qualquer irradiação solar média local. Por fim, realiza-se uma análise de viabilidade econômica dos equipamentos.

Palavras chave: 1.Energia solar 2.Geração de energia elétrica 3.Motores térmicos

1. Introdução

Na atualidade, um grande desafio da engenharia é a otimização do gerenciamento dos recursos naturais. Esta atitude objetiva em última instância o desenvolvimento sustentável. Visando isto, estão sendo estudadas técnicas para melhorar o uso de fontes renováveis de energia, como: solar, eólica, hidráulica e de biomassa. Outra tendência é aprimorar os mecanismos de transformação energética. Deseja-se evitar desperdícios. O presente trabalho se insere neste contexto, na medida em que objetiva estabelecer o projeto de coletores solares de disco parabólico com motor Stirling e gerador elétrico no foco. Isto é, trata-se de uma aplicação de geração de energia elétrica a partir de energia solar. Dentre as alternativas de coleta solar para fins de produção de eletricidade esta é, atualmente, a que se mostra mais eficiente. No entanto, esta, ainda é pouco difundida no mercado, os projetos já instalados e funcionando são protótipos.

Uma vantagem da utilização deste dispositivo é o fato dele ir de encontro com a tendência de descentralização da produção de energia elétrica. Ele pode ser usado para prover comunidades afastadas dos grandes centros com eletricidade. E, seu caráter modular permite, ainda, se instalar mais unidades, relativamente rápido, caso a demanda de energia elétrica da comunidade aumente significativamente.

O resultado deste trabalho consiste em uma planilha que fornece o dimensionamento do equipamento, bem como uma estimativa de custos. Para tanto, basta o usuário inserir como dados de entrada a irradiação solar média do local de instalação e a demanda de potência elétrica a ser atendida. Tal planilha foi elaborada a partir da generalização do método de projeto aplicado a um coletor ou concentrador solar base, sobre o qual se discorrerá ao longo do texto.

A Fig. (1) expõe um sistema concentrador solar / Stirling construído e em operação.



Figura 1. Dispositivo similar ao projetado (EuroDish, 2002)

2. Conceitos fundamentais sobre radiação

Para o desenvolvimento do presente trabalho é essencial o conhecimento de certos conceitos a cerca da radiação, já que, a energia solar aproveitável por métodos convencionais de coleta, chega na superfície terrestre na forma radiante. A radiação é uma forma de transporte de energia que pode ser vista como a propagação de ondas eletromagnéticas, portanto, ela apresenta possíveis comprimentos de onda. Muitas das propriedades físicas da radiação dependem do comprimento de onda considerado (propriedades espectrais), por isso é comum se trabalhar com as chamadas

propriedades totais, que são médias integradas das propriedades espectrais, para todos comprimentos de onda ou para uma banda de comprimentos. Além da característica espectral da radiação, existe outra que também é fundamental, a direcional. A não ser que a superfície emissora de radiação seja difusa, as intensidades e outras propriedades mudam conforme a direção em que se avalia a emissão. Mas também é muito comum trabalharmos com médias integradas sobre toda a região de propagação da radiação.

Definamos, inicialmente, pelo menos duas grandezas essenciais ao projeto do coletor solar, estas são: irradiação (G) e poder emissivo (E). A irradiação consiste no fluxo de energia radiante que incide sobre uma superfície, por unidade de área desta. Já o poder emissivo quantifica o quanto de energia por unidade de tempo e de área da superfície emissora, pode ser emitida, estando este, estritamente ligado à temperatura da superfície emissora.

Outras três propriedades de interesse para o projeto são: refletividade (ρ), absortividade (α) e transmissividade (τ). A primeira representa quanto da irradiação incidente é devolvida ao meio por reflexão. A segunda indica quanto da irradiação incidente é absorvida pela superfície. E, a última nos diz quanto da irradiação incidente atravessa a superfície.

O corpo negro é uma superfície ideal, que serve como base para muitos cálculos nas análises da radiação. Ele tem as seguintes propriedades:

- Absorve toda a radiação incidente, independentemente do comprimento de onda e direção.
- Para uma temperatura e comprimento de onda dados, nenhuma superfície pode emitir mais energia do que um corpo negro.
- Embora a radiação emitida por um corpo negro seja uma função do comprimento de onda e da temperatura, ela é independente da direção. Isto é, o corpo negro é um emissor difuso.

3. Coletores solares

Os parâmetros mais significativos de um concentrador solar são suas taxas de concentração. Existem várias formas de se definir tais taxas, mas as mais usuais são: taxa geométrica de concentração (C_g) e taxa de concentração de fluxo (C_f). Suas expressões matemáticas são dadas pelas Eqs. (1) e (2).

$$C_g = \frac{A_a}{A_r} \quad (1)$$

$$C_f = \frac{G_r}{G_a} \quad (2)$$

Os termos A_a e A_r são as áreas da abertura do coletor e do receptor, respectivamente. Já, G_r e G_a são as irradiações incidentes no receptor e na abertura do coletor, respectivamente. Repare que se não houvesse perdas no processo de reflexão do concentrador, as duas taxas de concentração seriam iguais. Mas, na realidade C_f é sempre menor que C_g . E, uma forma de se mensurar quanto da energia disponível que chega no coletor é transmitida ao receptor, é por meio da razão:

$$\eta_{CO} = \frac{C_f}{C_g} = \frac{G_r}{G_a} \cdot \frac{A_r}{A_a} \quad (3)$$

Esta relação é conhecida como eficiência de concentração. E, é claro, quanto maior, melhor é o aproveitamento da energia solar feito pelo coletor. Para concentradores parabólicos circulares como o da Fig. (1) o valor de C_g na prática varia entre 100 e 5000.

Esses sistemas consistem em refletores em forma de “pratos” parabólicos que concentram os raios solares incidentes em um receptor localizado no ponto focal. A temperatura no foco da parábola atinge altas temperaturas chegando até a 750°C. Esses concentradores são montados para rotacionarem em torno de dois eixos distintos para seguir o Sol, já que para uma eficiência máxima há a necessidade de que os raios incidentes sejam normais à abertura do coletor.

De todos os tipos de concentradores solares, esse sistema tem mostrado a maior eficiência de geração elétrica, chegando a cerca de 29% com uso do motor Stirling no foco. A faixa de potências elétricas geradas com esta configuração é de 5 a 25 kW.

A geometria deste tipo de coletor é fixada por dois parâmetros, o diâmetro da abertura D e a distância focal F , ou o diâmetro da abertura D e a razão de abertura $N = D/F$. A Fig. (2) mostra a seção transversal de um concentrador parabólico circular.

A superfície parabólica tem a propriedade de refletir todos os raios solares que incidam paralelos ao eixo óptico do espelho (eixo que liga o ponto O ao Foco), para o seu foco como se observa na Fig. (2):

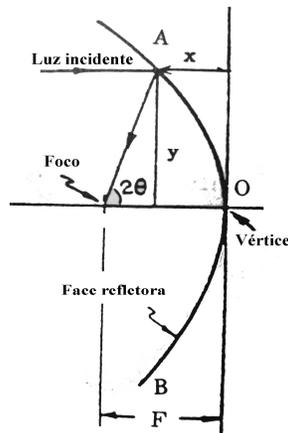


Figura 2. Esquema geométrico do perfil parabólico (Fujii, 1990)

A partir da Fig. (2) é possível obter um série de relações geométricas, sendo a mais importante:

$$x = \frac{1}{4F} y^2 \quad (4)$$

Esta, relaciona as coordenadas cartesianas que descrevem a curva à distancia focal da parábola.

A Fig. (3), expõe mais ou menos o mesmo arranjo da Fig.(2), mas agora leva-se em conta o seguinte fato: os raios solares não incidem perfeitamente paralelos entre-si, mas sim com um ângulo sólido de aproximadamente 32'.

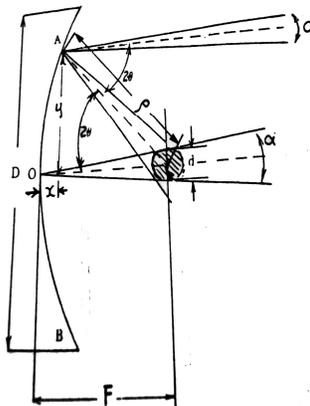


Figura 3. Esquema do perfil parabólico levando se em conta o ângulo de incidência de 32' (Fujii, 1990)

Esta incidência não paralela causa a concentração dos raios solares, não em um ponto, mas sim sobre uma região de diâmetro $d = 0,0093F$, onde F é a distância focal.

4. Escolha de parâmetros do coletor ou concentrador (base para confecção da planilha geral)

Optou-se por utilizar um concentrador parabólico composto por um conjunto de 12 segmentos de fibra de vidro, um dos seguimentos é exposto na Fig. (4). Um fino espelho de vidro, com espessura de 0,8 mm, é colados na superfície de cada um dos seguimentos, com isso atinge-se uma refletividade de $\rho = 0,94$. Esta escolha se deve ao fato de existir um protótipo real com estas características. Com isso, é possível comparar os resultados teóricos com os práticos e verificar a qualidade do modelo adotado.



Figura 4. Segmento do coletor parabólico (EuroDish, 2002)

A seguir escolhe-se os parâmetros que definem o perfil parabólico do coletor.

Parâmetros relevantes:

- Diâmetro da abertura: $D = 8$ m.
- Distância focal: $F = 4$ m.
- Razão de abertura: $N = 2$.
- Área da abertura: $A_a = 50,27$ m².
- Assumindo-se que a radiação solar incidente média seja $G_a = 640$ W/m² tem-se que o fluxo de energia incidente sobre o coletor:
- $Q_{\text{coletor}} = G_a \cdot A_a = 32,17$ kW.

5. Escolha de parâmetros do receptor (base para confecção da planilha geral)

A Fig. (5) representa um receptor do tipo cavidade com orifício, que é o mais usual para a presente aplicação, dentro dele ficam os tubos (Fig. (6)) que trocam calor com o fluido de trabalho do ciclo Stirling. A Fig. (7) apresenta o procedimento geométrico para determinação do diâmetro da abertura da cavidade do receptor.

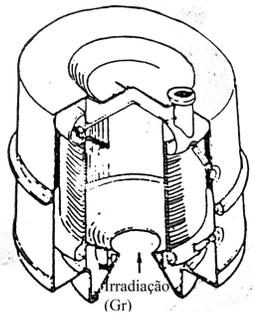


Figura 5. Receptor (Fujii, 1990)

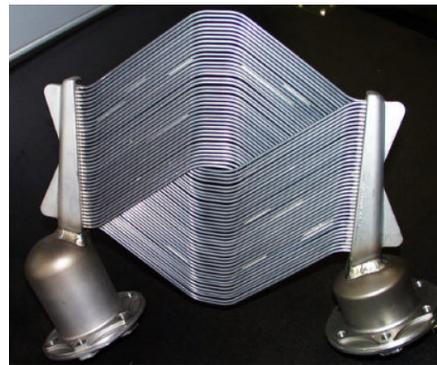


Figura 6. Tubos internos ao receptor (EuroDish, 2002)

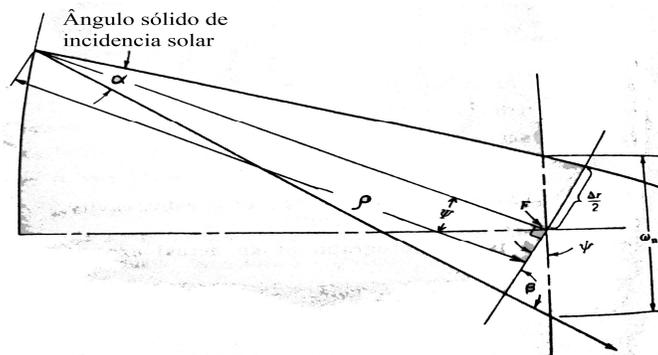


Figura 7. Esquema geométrico para determinação da abertura do receptor (Fujii, 1990)

A partir da Fig. (7), calcula-se $\psi = 53,13^\circ$. Com isso, obtém-se um valor de diâmetro de abertura ω de aproximadamente 8 cm, no entanto, será adotado o dobro disto (16 cm), para que C_g fique em torno de 2500. Assim, os parâmetros do receptor são:

- Área da abertura: $A_r = 0,02 \text{ m}^2$.

- Taxa de concentração geométrica: $C_g = 2513$.

6. Distribuições de irradiação e temperaturas no plano focal (na abertura da cavidade do receptor)

A Eq. (5) expressa uma forma de se obter a irradiação incidente sobre o receptor:

$$G_r = \frac{4G_a\rho}{(0,0093)^2} \left[1 - \left(\frac{16 - N^2}{16 + N^2} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Onde G_a é a irradiação incidente sobre a abertura do espelho (coletor) e ρ é a refletividade.

Esta equação mostra que a irradiação que atinge o receptor (G_r) não está relacionada com os valores individuais de D ou F , mas sim ao valor da razão de abertura N (neste caso tem-se $N = 2$). É importante o fato de que: o maior valor de G_r é encontrado no centro da imagem solar no plano focal e seu valor diminui à medida que nos afastamos deste ponto central. A Fig. (9) mostra a dependência entre o valor da irradiação e a posição no plano focal, nela são apresentadas curvas para diferentes valores de N , onde o eixo das abscissas representa r/d , sendo r : a distância entre o ponto do plano focal considerado e o centro da imagem solar, e d o diâmetro da imagem solar.

O eixo das ordenadas fornece os valores do adimensional $\frac{G_r}{4G_a\rho / (0,0093)^2}$ ou $\left[1 - \left(\frac{16 - N^2}{16 + N^2} \right)^2 \right]$, que para $r/d > 0,5$ deve

decrecer conforme a Fig. (9).

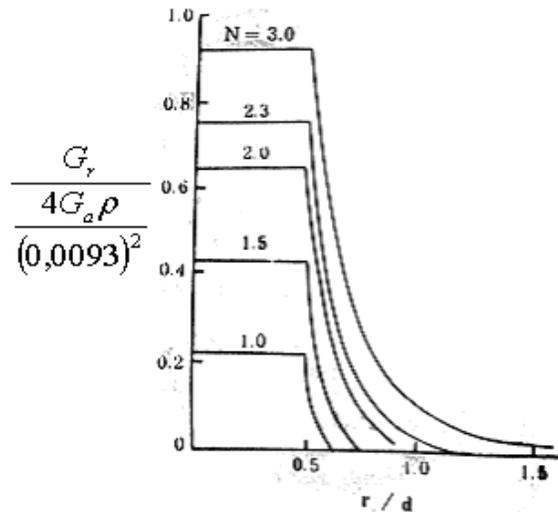


Figura 8. Variação da irradiação no receptor em função da posição do plano focal para diferentes valores de razão de abertura (N) (Fujii, 1990)

Como $\frac{4G_a\rho}{(0,0093)^2}$ é constante, quando r/d aumenta (para $r/d > 0,5$) G_r diminui. Portanto, adotou-se o seguinte procedimento: estimou-se um G_r médio, ponderado pelas áreas sobre as quais seus diferentes valores incidem. Isto é, considere as circunferências concêntricas expostas na Fig. (10), fazendo uso da Eq. (5) e da Fig. (9), obtém-se os valores dos G_r 's para cada uma das regiões anelares, em seguida se calcula a média ponderada pelas áreas. Foi feita a seguinte ponderação: $G_{rMÉDIO} = (G_{r1}A_1 + G_{r2}A_2 + \dots + G_{ri}A_i) / A_r$. O espaçamento entre as circunferências utilizado foi de $0,1r/d$.

O mesmo procedimento pode ser adotado para se calcular uma temperatura média do receptor, fazendo uso da Eq. (6) e da Fig. (9), já que na Eq. (6) também aparece o adimensional: $\left[1 - \left(\frac{16 - N^2}{16 + N^2} \right)^2 \right]$.

$$T_m^4 - T_o^4 \cong \frac{4G_a \rho}{(0,0093)^2} \left[1 - \left(\frac{16 - N^2}{16 + N^2} \right)^2 \right] \frac{1}{\sigma} \quad (6)$$

Onde, T_m é a temperatura média do receptor (plano focal), T_o a temperatura do ambiente e σ a constante de Stefan-Boltzmann, que vale $5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Repare que os tubos do receptor que trocam calor (Fig. (7)) não estão no plano focal (abertura da cavidade), mas sim um pouco mais a frente deste, no entanto, eles estão próximos o suficiente do orifício para que possamos considerar que sua temperatura é a mesma que seria se estivessem no plano focal.

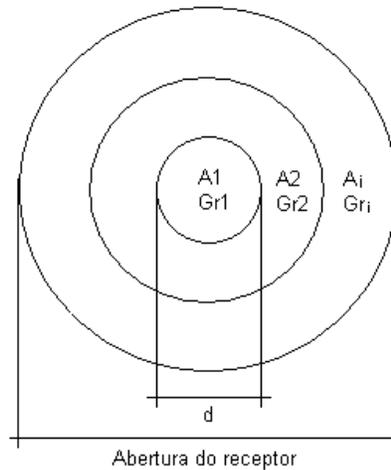


Figura 9. Circunferências concêntricas para obtenção de G_r médio e T_m

A distribuição não uniforme da irradiação no plano focal pode ser melhor enxergada no gráfico da Fig. (11), onde os pontos do plano (xy) representam os pontos do plano focal (abertura do receptor), e o eixo z, os valores de G_r em kW/m^2 .

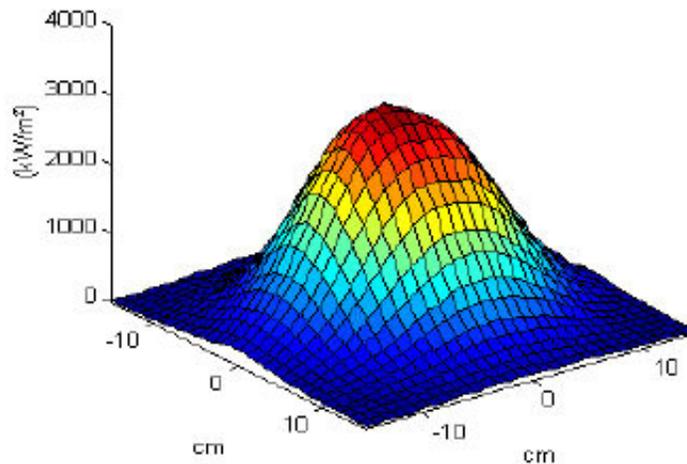


Figura 10. Representação da distribuição de G_r no plano focal (EuroDish, 2002)

O valor médio encontrado para G_r vale: $G_r = 1242,6 \text{ kW/m}^2$.

Assim, a energia térmica que será disponibilizada ao motor Stirling (sem computar as perdas por re-emissão) pode ser calculada como $Q_{\text{rec}} = G_r \cdot A_r = 26,1 \text{ kW}$. Disposto deste valor e do valor do fluxo de energia incidente sobre o coletor ($G_a \cdot A_a$), pode-se obter a eficiência de concentração do coletor $\eta_{CO} = 81,1\%$.

Assumindo uma temperatura ambiente de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, tem-se: $T_m = 493 \text{ }^\circ\text{C}$.

As ponderações foram feitas em planilhas de Excel, o que permitiu que fossem desenvolvidas rotinas em linguagem VBA que possibilitam obter G_r médio e T_m a partir de G_a e parâmetros geométricos do coletor e receptor, fornecidos pelo usuário.

7. Perda de calor por re-emissão

A partir da equação: $\dot{Q}_{perdas} = \epsilon \sigma A_r (T_m^4 - T_o^4)$, pode-se encontrar a quantidade de calor perdida para o meio por radiação do receptor. Assumindo uma temperatura ambiente de 25 °C e emissividade de corpo negro para o receptor, ou seja 1, tem-se: $Q_{perdido} = 382$ W. Assim, a energia térmica efetivamente disponível ao ciclo Stirling vale: $Q_{disp} = 25,7$ kW.

8. Cálculo do rendimento do motor Stirling

O rendimento do ciclo Stirling é dado pela Eq. (7):

$$\eta_{STIRLING} = \frac{m.R.\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)(T_H - T_L)}{m.R.T_H.\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)} = \frac{(T_H - T_L)}{T_H} \quad (7)$$

Como o rendimento térmico ideal do ciclo Stirling é igual ao de Carnot, e agora já dispomos das temperaturas dos reservatórios térmicos de alta e baixa, podemos obter o seu valor. Para $T_H = 493^\circ\text{C} = 766$ K e $T_L = 25^\circ\text{C} = 298$ K, tem-se um rendimento térmico igual a: $\eta = 61\%$. No entanto, como os motores reais apresentam várias irreversibilidades, consideremos que o rendimento real seja mais ou menos metade deste, conforme o proposto em (Walker, 1973), portanto, $\eta = 30\%$.

9. Potência elétrica disponível e rendimento global

A potência mecânica disponível no eixo do motor Stirling será da ordem de $P_{mec} = \eta \cdot Q_{disp}$, $P_{mec} = 7,7$ kW.

Agora, supondo que a eficiência do gerador elétrico seja da ordem de 95%, teremos uma potência elétrica disponível de: $P_{el} = 7,3$ kW.

Com isso, tem-se um rendimento global de geração de energia elétrica de: $\eta_{total} = P_{el}/Q_{coletor} = 22,7\%$.

10. Generalização do método

Baseando-se na metodologia desenvolvida nos tópicos 4 a 9 deste artigo, a qual objetiva obter a potência elétrica disponibilizada a partir de informações de dimensões do equipamento e da irradiação solar média local, elabora-se uma abordagem inversa. Em que, o usuário da planilha fornece a demanda de potência elétrica desejada e o valor de G_a , assim a planilha mostra as dimensões e outros parâmetros relevantes do projeto, bem como uma estimativa de custos. Os procedimentos para se obter a planilha objetivo são expostos na seqüência. Como já mencionado no item 6, foi possível desenvolver rotinas em Visual Basic para o Excel. Estas, fornecem o valor da irradiação média que atinge a abertura do receptor (G_r), bem como sua temperatura média (T_m). Os dados de entrada para ambas são: a irradiação média local (G_a), o diâmetro da abertura do coletor parabólico (D_a), a razão de abertura do coletor (N) e o diâmetro de abertura do receptor (d_{rec} ou ω_n). O nome das funções são $Grmedio(G_a, D_a, N, d_{rec})$ e $Trmedio(G_a, D_a, N, d_{rec})$, respectivamente. G_a , D_a e N devem ser dados pelo usuário, mas d_{rec} é calculado a partir de outra função, a qual se chama $tpsi(N)$. Esta, calcula a tangente do ângulo ψ (vide Fig. (7)) e d_{rec} é obtido por geometria, mas o d_{rec} adotado é o dobro do obtido pela equação, por motivos já explicados no item 5.

Fazendo uso destas três funções é possível elaborar uma série de planilhas de dados que serão usadas como base para a confecção da ferramenta que se objetiva construir.

É importante dizer que para todas as planilhas o valor da razão de abertura do espelho parabólico será sempre mantido em $N = 2$. Isto, pois seria complicado embutir as informações gráficas da Fig. (9) na programação das rotinas.

A Tab. (1) expõe uma das planilhas base, na qual, G_a foi mantido em 600 W/m² e variou-se D_a de 6 a 8 m. No trabalho completo utilizaram-se mais valores de D_a . E, também, planilhas análogas foram feitas com diferentes valores de G_a : 400, 500, 700 e 800 W/m². Com isso, pôde-se estabelecer uma relação entre G_a , P_{El} e D_a . A maneira de se fazer isso é exposta na seqüência. Com estes dados é possível plotar um gráfico de D_a em função de P_{El} (Fig. (12)), pode-se então interpolar os pontos impressos, por uma função do tipo $D_a = \text{“coeficiente”} \cdot P_{El}^{0,5}$. Faremos isso, também, para os valores de G_a diferentes de 600 W/m². Por fim ter-se-á cinco funções de interpolação (para cada um dos G_a 's) que relacionam P_{El} com D_a , então é feito um gráfico dos coeficientes destas funções em função de G_a (Fig. (13)). Dispondo destes pontos pode-se interpolá-los por uma função potência do tipo: “coeficiente” = G_a^x .

Finalmente, é fácil elaborar uma planilha em que o usuário entre com G_a e o Excel calcula internamente o coeficiente que relaciona P_{El} e D_a . Então, o usuário deve fornecer também a demanda de potência elétrica P_{El} , assim a planilha fornece o diâmetro de abertura do concentrador parabólico e a partir daí pode computar todas as outras variáveis do projeto, um exemplo para $G_a = 800$ W/m² e $P_{El} = 7,5$ kW pode ser visto na Tab. (2). Adicionalmente, o Excel fornece uma tabela com estimativas de custos de instalação e operação, tais valores foram coletados do site “solarpaces” e apresentam incerteza de mais ou menos 15%, por isso, também são mostrados os custos máximos e mínimos na Tab. (3), que corresponde à exibição de custos do protótipo dimensionado na Tab. (2).

Tabela 1. Exemplo de planilha base com $G_a = 600 \text{ W/m}^2$

Dados de Entrada				Dados de Saída												
G_a	D_a	N	F	A_a	d_r	A_r	Gr	C_f	C_g	η_{CO}	T_m	$\eta_{Stirling}$	P_{Term}	$P_{Perdida}$	P_{El}	η_{Total}
600	6	2	3	28,27	0,116	0,0106	1389,045	2315	2659	0,87	564,13	0,32	14,770	0,291	4,429	0,26
600	7	2	4	38,48	0,136	0,0145	1389,078	2315	2659	0,87	564,13	0,32	20,104	0,397	6,029	0,26
600	8	2	4	50,27	0,155	0,0189	1389,102	2315	2659	0,87	564,13	0,32	26,259	0,518	7,874	0,26

Legenda:

- G_a – Irradiação solar incidente sobre o coletor [W/m^2]
 D_a – Diâmetro de abertura do coletor [m]
N – Razão de abertura do coletor
F – Distância focal do coletor [m]
 A_a – Área de abertura do coletor [m^2]
 d_r – Diâmetro da abertura do receptor [m]
 A_r – Área da abertura do receptor [m^2]
 G_r – Irradiação incidente sobre o receptor [W/m^2]
 C_f – Taxa de concentração de fluxo
 C_g – Taxa de concentração geométrica
 η_{CO} – Eficiência de concentração
 T_m – Temperatura média no receptor [$^{\circ}\text{C}$]
 P_{Term} – Potência disponibilizada ao motor Stirling [kW]
 $P_{Perdida}$ – Potência desperdiçada em perdas [kW]
 P_{El} – Potência elétrica produzida [kW]
 η_{total} – Rendimento global

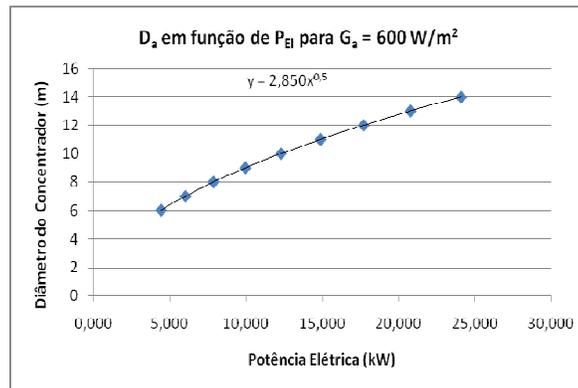


Figura 11. Estabelece a relação $D_a = 2,85 \cdot P_{El}^{0,5}$ para $G_a = 600 \text{ W/m}^2$

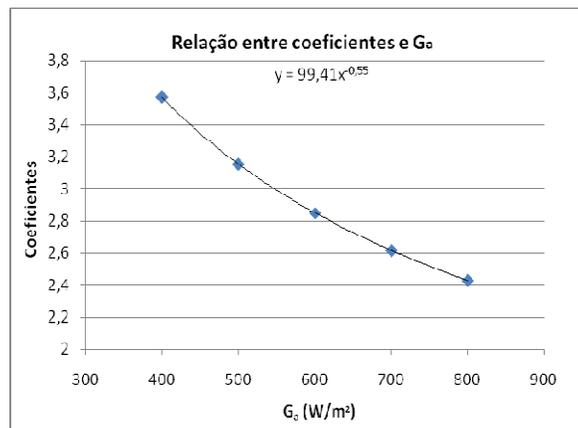


Figura 12. Estabelece a relação “coeficiente” = $99,41 \cdot G_a^{-0,55}$

Repare que estas curvas seriam retas, conforme exposto no trabalho completo, se tomássemos a área do coletor, ou D_a^2 em função de P_{El} . Pois, obviamente, a potência elétrica produzida é diretamente proporcional à área projetada do espelho parabólico.

Tabela 2. Dimensionamento do equipamento para $G_a = 800 \text{ W/m}^2$ e $P_{EI} = 7,5 \text{ kW}$

Dados de Entrada			Dados de Saída														
Ga	PEI	N	D _a	F	A _a	d _r	A _r	Gr	C _f	C _g	η _{CO}	T _m	η _{Stirling}	P _{Term}	P _{Perdida}	η _{Total}	
800	7,5	2	6,89	3,45	37,29	0,1336	0,0140	1852,455	2316	2659	0,87	607,84	0,33	25,980	0,472	0,25	

Tabela 3. Exemplo de estimativa de custos para $P_{EI} = 7,5 \text{ kW}$

Custo inicial	Média (R\$)	Mínimo (R\$)	Máximo (R\$)
Concentrador Parabólico	56.700,00	48.195,00	65.205,00
Receptor	2.700,00	2.295,00	3.105,00
Motor Stirling	74.250,00	63.112,50	85.387,50
Gerador	1.458,00	1.239,30	1.676,70
Sistema de Refrigeração	945,00	803,25	1.086,75
Material Elétrico	675,00	573,75	776,25
Construção da Planta	6.750,00	5.737,50	7.762,50
Engenharia	14.580,00	12.393,00	16.767,00
Início de Operação	4.725,00	4.016,25	5.433,75
TOTAL	162.783,00	138.365,55	187.200,45
Custo de operação	R\$/kWh	R\$/kWh	R\$/kWh
Mão de obra	0,22	0,18	0,25
Material	0,16	0,14	0,19
TOTAL	0,38	0,32	0,43

11. Conclusão

O Brasil é um país com elevado potencial para implementação de plantas geradoras solares, devido à existência de grandes áreas com alto nível médio de irradiação solar direta, principalmente nas regiões localizadas no estado da Bahia e norte de Minas.

A geração heliotérmica, através do uso da tecnologia do disco parabólico, pode vir a ser uma boa opção para o setor elétrico brasileiro, tendo em vista o atendimento de comunidades isoladas, particularmente em regiões como no semi-árido baiano, onde se apresentam as melhores condições climatológicas para implantação de plantas térmicas, tais como: baixa nebulosidade, precipitação reduzida, baixa umidade, alta insolação, e um dos mais altos níveis de radiação solar direta no Brasil. Sem contar que se trata de uma forma de energia limpa, sem emissão de poluentes e que causa pouquíssimo impacto ambiental. Além disso, é uma forma de descentralizar a geração elétrica e aliviar o sistema atualmente sobre-carregado, garantindo maior segurança e estabilidade. Outra observação plausível é que se a matriz energética brasileira, hidrelétrica, passar por novos períodos de escassez, isto é, de seca, os sistemas solares são bons para compensar este desequilíbrio, já que na estiagem há menos nuvens e conseqüentemente maior incidência solar.

No entanto, ainda deve haver uma evolução tecnológica que permita baratear os componentes do conjunto concentrador/Stirling para que sua instalação possa se tornar viável nas regiões do país que o mais necessitam, isto é, as zonas isoladas dos grandes centros urbanos. Observa-se que os equipamentos mais caros são: o motor Stirling e o concentrador parabólico e que o custo de operação (R\$ 0,43/kWh) conforme esperado, é alto em relação ao preço da eletricidade fornecida, por exemplo, pela Celpe (distribuidora de energia do estado de Pernambuco, região geograficamente privilegiada para instalação de dispositivos heliotérmicos), cuja tarifa para consumidores de baixa renda (público alvo do projeto em questão) vale 0,114 R\$/kWh (para consumidores de 0 a 30 kWh mensais). Como se pôde ver o custo inicial dos protótipos também é bastante elevado em relação, por exemplo, ao custo de um gerador a Diesel de potência equivalente. Enquanto pode-se adquirir um grupo gerador a diesel de 7,5 kW por R\$ 3.500,00, um equipamento concentrador/Stirling de mesma potência não sai por menos que R\$ 138.000,00. Mas as perspectivas são otimistas, enquanto, hoje um protótipo custa em média US\$ 12.000,00/kW, estima-se que em 2030 este custará US\$ 1.000,00/kW. Mas, a previsão para 2030 se baseia na implantação de uma central geradora com muitos módulos e capacidade de geração de 30 MW. As expectativas são, ao contrário de um dos propósitos deste trabalho, de se construir grandes instalações de geração contendo milhares de dispositivos concentrador/Stirling. Esta alternativa parece ser bem mais promissora do que a fabricação de módulos individuais para atender pequenas comunidades isoladas. A não ser

que seja fabricada uma grande quantidade de equipamentos para atender muitas comunidades e vilas rurais, para que seu custo diminua. Perceba que estes valores não foram obtidos diretamente de fornecedores, mas sim de um levantamento disponibilizado no site SolarPaces. Por isso, podem não condizer com a realidade, tanto é que apresentam uma incerteza de mais ou menos 15%. Como a confecção da planilha de custos se baseia na coluna “ATUAL” da Tab. (4.19), elaborou-se, também, outra planilha em que o usuário pode entrar com os valores dos custos individuais em R\$/kW, para obter uma estimativa mais precisa e condizente com a realidade do tempo presente em que se esteja usando a planilha.

Vale ainda comentar que hoje é muito difícil encontrar informações sobre este tipo de dispositivo, a maioria dos textos são datados no máximo do ano de 2003. Parece que a indústria apresenta ciclos de euforia e apatia quanto ao tema concentrador/Stirling, as empresas fazem protótipos, desistem dos projetos e às vezes voltam a tentar, caso da MDA, isto é evidenciado no tópico 2.3. A despeito disto, existe algum investimento em pesquisas nesta área, talvez o maior representante destas seja o SunLab, cujo site encontra-se na bibliografia recomendada. Outra empresa que ainda investe em protótipos é a Stirling Energy Systems, cujo site também está na bibliografia recomendada, esta tem muitos projetos para o futuro, mas também parece estar esperando a evolução tecnológica que ira baratear os sistemas concentrador/Stirling.

Por fim, pode-se dizer que no que tange o desenvolvimento de uma ferramenta para dimensionamento de dispositivos concentrador/Stirling o presente trabalho cumpriu sua missão. Sendo que a metodologia desenvolvida pode ser aplicada para o projeto de concentradores solares de foco pontual para outros fins também, por exemplo, na geração de vapor para utilização em ciclos Rankine ou em processos.

12. Bibliografia recomendada

- Van Wylen, G.J.; Sonntag, R.E.; Borgnakke, C. “Fundamentos da Termodinâmica” Edgard Blücher, 2003.
DeWitt, D.P.; Incropera, F.P. “Fundamentos de Transferência de Calor e Massa” LTC, 2003.
Haywood, D. “An Introduction to Stirling-Cycle Machines” Stirling-Cycle Research Group, University of Canterbury.
Walker, G. “Stirling-cycle Machines”, Oxford University, 1973.
Fujii I. “From Solar Energy to Mechanical Power” harwood academic publishers, 1990.
Fraas, Arthur P. “Heat Exchanger Design” 2. ed, Wiley Interscience, 1989.
Afgan, N.H.; Schlünder, E.U. “Heat Exchangers: Design and Theory Sourcebook” Scripta Book Company, Washington, D.C, 1974.
Barros, R.W.; “Avaliação Teórica e Experimental do Motor Stirling Modelo Solo 161 Operando com Diferentes Combustíveis” Dissertação de estrado Universidade Federal de Itajubá, 2005.
Wilke, H. “Desenvolvimento de um Módulo Combustor Biomassa-Motor Stirling Aplicada a Sistemas de Geração Isolada e Baseados em Gerado de Indução” Universidade Federal de Itajubá, 2003.
Schlaich Bergermann and Partner, Structural Consulting Engineers “EuroDish – Stirling”, 2002. (Internet)
Cordeiro, P.; “START Report 2/98” International Energy Agency (IEA), 1997. (Internet)
Trigoso, F. B. M. “Demanda de Energia Elétrica e Desenvolvimento Socioeconômico: o caso das comunidades rurais eletrificadas com sistemas fotovoltaicos” Tese de Doutorado apresentada ao programa Iterunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, 2004
<http://www.solarpaces.org/> (01/11)
<http://www.stirlingenergy.com/> (01/11)
<http://www.energylan.sandia.gov/sunlab/index.html> (23/10)
<http://www.sbp.de/en/fla/mittig.html> (24/10)
http://www.solo-germany.com/english/frames/frame_stirlingengine2.html (21/10)
<http://www.celpe.com.br> (10/11)

ELECTRICITY GENERATION WITH SOLAR DISH AND STIRLING ENGINE

Lourenço Batista Roxo

lourenco_roxo@yahoo.com.br

The goal of this report is the project of parabolic dish mirrors with a Stirling engine linked to a generator at the focus point. This kind of device exists at least since the seventy's. But, it is still being a technology that is not widely spread. In this text, essential concepts for understanding the systems which deliver mechanical energy from a solar source are shown. Methods to calculate values related to the solar radiation are also exposed, and relations between the geometrical parameters of the collectors and the thermal power available, after concentration, are developed. Furthermore, the Stirling cycle is analyzed, and equations about the energy flux over the cycle are presented. The collector and the receptor devices are projected; the engine efficiency is estimated in order to obtain the global efficiency and the disposable electrical power. A project is made based on a medium value of solar irradiation of a certain region here in Brazil. This one is used as a methodological base for the confection of an Excel plan which generalizes the calculation method and allows us to obtain the equipments dimensions for any electric power demand or any medium local solar irradiation. Finally, it is made an economic viability analysis of the equipments. This text aims to be a useful tool for future researches and experiments on the use of punctual focus parabolic concentrators and Stirling Engines.

Keywords: 1.Solar energy 2.Electricity generation 3.Thermal engines

