

# SIMULAÇÃO DE UMA CENTRAL SOLAR DE 1MWe COM CONCENTRADORES CILINDRO PARABÓLICOS

C. A. A. Oliveira – carlos@ufpe.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas - Campus Palmeira dos Índios

N. Fraidenraich – nf@ufpe.br

O. C. Vilela – ocv@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia

**Resumo.** A geração descentralizada de energia a partir de diversas fontes primárias tem aberto, na última década, um amplo espaço para a utilização de energias renováveis, particularmente solar termoelétrica e eólica. A incorporação e domínio dessa tecnologia, nos países que contam com recurso solar de boa qualidade, constitui um objetivo da maior importância. Este trabalho faz parte do processo de implantação de uma primeira central solar experimental na Região Nordeste do Brasil. Seu objetivo consiste em estimar os principais parâmetros operacionais de uma planta de geração solar termoelétrica com potência nominal de 1 MWe, formada por um campo de concentradores cilindro parabólicos, trocadores de calor e um bloco de potência. Um modelo analítico, desenvolvido recentemente, que possibilita a simulação de grandes e pequenos campos solares é utilizado para este propósito. O ciclo utilizado é convencional, trabalhando com um fluido térmico intermediário a uma temperatura máxima de 391 °C, trocadores de calor para pré-aquecer, evaporar e superaquecer o fluido vapor-água e um ciclo Rankine para a conversão da energia térmica em mecânica. O modelo teórico utiliza um ciclo de Carnot endo-reversível que simula apropriadamente o ciclo Rankine real. Os principais parâmetros estimados para uma planta solar de 1 MWe localizada na cidade de Ouricuri-PE, Brazil, são: área de coletores de 7.536 m<sup>2</sup>, área total do campo solar de 28.260 m<sup>2</sup>, 32 coletores parabólicos (4 linhas com 8 coletores cada). A produção anual de energia elétrica líquida e energia térmica útil são de 1,57 MWe e 4,86 MWt, respectivamente. As simulações mostraram um fator de capacidade para a planta de 17,9% com uma eficiência média anual na conversão da energia solar em elétrica líquida de 16,2%.

**Palavras-chave:** Modelagem, Cilindro Parabólico, Planta Solar

## 1. INTRODUÇÃO

Centrais térmicas solares que utilizam concentradores cilindro parabólicos são atualmente a tecnologia solar para geração de eletricidade mais experimentada e bem sucedida no mundo. Isto é demonstrado pelas centrais SEGS (Solar Electric Generating System) localizadas na Califórnia, onde a primeira planta opera desde 1984 e um total de nove plantas foram construídas até 1991, totalizando uma potência de 354 MWe.

Os esforços para reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> têm encorajado a utilização de energias renováveis ao redor do mundo. Após 15 anos sem que houvesse a construção de qualquer planta cilindro parabólica comercial, desde a última planta SEGS, novos projetos têm sido executados. EUA, Espanha e Alemanha são importantes investidores nesta tecnologia. A construção de novas plantas na Espanha e nos EUA, algumas destas já finalizadas, é uma indicação clara de que os investimentos em plantas de geração solar têm retornado.

Avanços recentes obtidos na qualidade dos componentes destas plantas, tanto do campo solar como no bloco de potência, têm contribuído para renovar os estudos visando à construção de estações de geração modular, com capacidades de geração entre 200KWe e 10MWe. O interesse nessa abordagem é discutido, por exemplo, em Hassani e Price (2001), Price e Hassani (2002) e Prabhu (2006). O conceito de planta modular com concentradores lineares procura integrar a tecnologia moderna de concentradores cilindro parabólicos com ciclos orgânicos modernos (organic Rankine cycle, ORC) para integrar uma planta na escala de 1 MWe de potência. Plantas deste tamanho têm o potencial de gerar energia *in situ* para atendimento de pequenas necessidades (geração no “varejo”), geração de energia “verde” de baixo custo ou utilizar estas plantas para suprir as necessidades de comunidades rurais distantes da rede elétrica.

Uma vez que o campo solar é integrado por uma série de colunas de coletores, facilmente adaptado para grandes e pequenas potências térmicas úteis, a principal preocupação para plantas solares de pequena potência é a disponibilidade de blocos de potência de boa eficiência. No projeto de planta solar térmica apresentado por Zarza *et al.* (2006) é utilizada um bloco de potência com eficiência nominal bruta de apenas 26%.

Este trabalho adere ao conceito convencional de plantas solares termoelétricas tipo SEGS, como primeiro passo para realizar, no futuro, um estudo das vantagens e desvantagens comparativas entre ambos os conceitos (Ciclos tipo SEGS e ORC). A construção de uma planta deste tipo em países não familiarizados com a tecnologia solar termoelétrica, mas que contam com um recurso solar de boa qualidade, pode ser considerada uma excelente oportunidade, com custo e risco baixos, para dispor de uma facilidade experimental e iniciar um processo de aprendizado e incorporação da tecnologia ao acervo científico-técnico nacional.

O objetivo deste trabalho consiste em estimar os principais parâmetros operacionais de uma planta de geração solar termoelétrica com potência nominal de 1 MWe. A planta tem a mesma configuração que uma planta convencional (SEGS) e consiste basicamente de um campo de coletores solares, um bloco de potência que converte a energia térmica em mecânica e posteriormente em elétrica um conjunto de trocadores de calor, onde a água é pré-aquecida, evaporada e, o vapor gerado, superaquecido. Um fluido térmico é usado para transferir energia do campo de coletor para a água. Os parâmetros da planta serão estimados através de simulações do desempenho utilizando um modelo analítico desenvolvido recentemente (Rolim et al, 2009). O modelo matemático utilizado não apresenta restrições no que se refere à potência a ser simulada.

## 2. PROCESSOS DE CONVERSÃO E CAMPO DE TEMPERATURAS

O modelo de Rolim et al. (2009) combina dois subsistemas, o campo de coletores solares e a estação de potência. A conversão da radiação solar em calor leva em consideração o comportamento não linear das perdas presentes nos coletores cilindro parabólicos. O ciclo de potência é considerado como endo-reversível. Este modelo permite simular a operação de plantas solares tipo SEGS de grande e pequena capacidade. Resultados obtidos por Fraidenaich *et al.*(1997) foram usados para determinar a saída do campo de coletores solares e outros parâmetros que dependem desta saída. Dois processos são considerados simultaneamente: (a) a transferência de energia entre o fluido térmico, circulando ao longo dos absorvedores do campo de coletores, e a água ou água-vapor e (b) e o ciclo termodinâmico da mistura água-vapor. A modelagem apresentada por Rolim et al. (2009) foi validada neste mesmo trabalho através de comparação com os resultados experimentais dados por Dudley et al. (1994).

A Fig. 1 mostra de uma maneira simples os processos de conversão que ocorrem na planta de geração solar. A radiação solar incidente no campo de coletores ( $I_{coll} \cdot A_{coll}$ ) se propaga ao longo dos espelhos parabólicos e é convertida em uma potência absorvida ( $P_{abs}$ ), onde  $I_{coll}$  é a irradiância direta, que incide a um certo ângulo do plano de abertura do coletor e  $A_{coll}$  é a área de abertura do coletor. A diferença entre a potência absorvida e a convertida ( $I_{coll} \cdot A_{coll} - P_{abs}$ ) corresponde as perdas ópticas. A potência absorvida é convertida em potência térmica útil ( $P_u$ ) e perdas térmicas ( $P_{loss}$ ). A potência térmica útil é expressada como aquecimento do fluido térmico. O processo de transferência de calor entre o fluido térmico e a água resulta em um vapor de água com entalpia elevada, que é convertido em potência mecânica no bloco de potência (turbo-geradores). A energia mecânica é então convertida em energia elétrica.

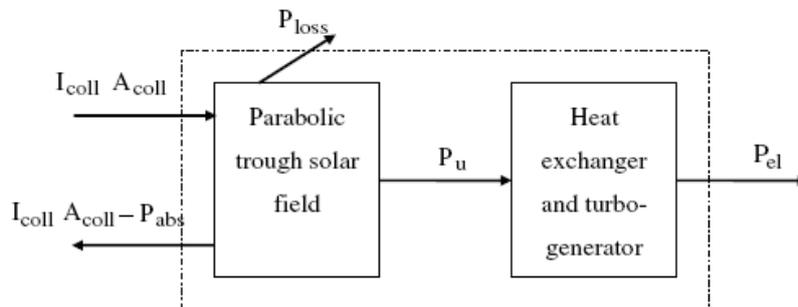


Figura 1 – Balanço de energia de uma central solar térmica (Rolim *et al.*, 2009).

O campo de temperaturas do sistema é mostrado na Fig. 2. A temperatura máxima do fluido térmico, prescrito pelo fabricante do mesmo, é  $T_4$  (cerca de 390 °C para o fluido usado na simulação). O fluido térmico se esfria atravessando o caminho  $(T_4)-(T_3)-(T_2)-(T_1)$ , enquanto o vapor d'água é aquecido seguindo o caminho  $(T_0)-(T_{ev})-(T_{sh})$ . O uso de correlações permite avaliar as propriedades físicas do fluido térmico para as várias temperaturas existentes. As menores diferenças de temperaturas ao longo dos caminhos de ambos os fluidos,  $(\Delta T_1 = T_4 - T_{sh})$  e  $(\Delta T_2 = T_2 - T_{ev})$ , usualmente chamadas de pinch points, devem ser sempre positivas. Elas têm sido estabelecidas em valores iguais a 20°C. A temperatura  $T_0$  é ajustada para um valor acima da temperatura do líquido de resfriamento disponível no local onde a planta é construída. Quanto maior for esta diferença de temperatura entre  $T_0$  e o líquido de resfriamento, menor será o tamanho necessário para o trocador de calor presente no lado do condensador. Equações de conservação do calor transferido entre o fluido térmico e a água permitem obter as outras temperaturas desconhecidas ( $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$ ) (Rolim *et al.*, 2009).

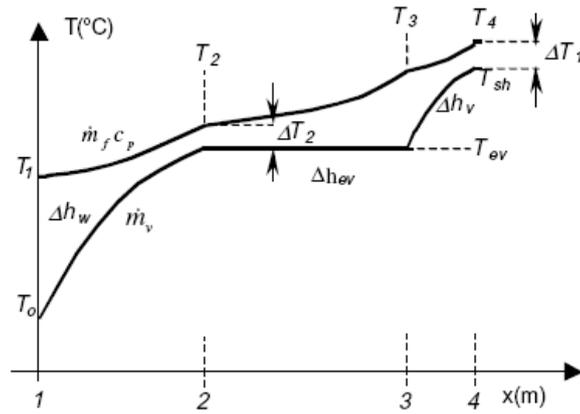


Figura 2 – Campo de temperaturas de uma planta solar térmica (Rolim *et al.*, 2009).

Uma vez colocadas as restrições acima, pode ser mostrado que o campo de temperaturas do fluido térmico e do vapor d'água depende apenas da temperatura de evaporação ( $T_{ev}$ ) que pode ser considerada como um parâmetro de otimização. Seguindo todas as considerações mencionadas, os principais parâmetros escolhidos para a planta de geração solar são mostrados na Tab. 1.

Tabela 1 – Parâmetros de projeto de uma planta de geração solar de 1 MWe.

Especificação	Valor Numérico	Unidade
Potência elétrica líquida	1,0	MW
Potência elétrica total	1,1	MW
Temperatura de saída do fluido térmico	390	°C
Temperatura de entrada do fluido térmico	290	°C
Temperatura de evaporação (10MPa)	311	°C
Temperatura de condensação do vapor (0.007MPa)	40	°C
Temperatura do vapor superaquecido	371	°C
Pressão do vapor superaquecido	10	MPa
Pressão no condensador	0,007	MPa
$\Delta T_1$	20	°C
$\Delta T_2$	20	°C
Eficiência de conversão da energia mecânica para elétrica	0,97	-
Eficiência isentrópica da turbina para um fluxo nominal	0,85	-
Temperatura ambiente do local (valor de referência)	29	°C

Visto que a eficiência do ciclo depende apenas das temperaturas definidas para a água e vapor ( $T_0$ ,  $T_{ev}$ ,  $T_{sh}$ ) e estes valores são assumidos como fixos, a eficiência do ciclo termodinâmico é constante. O valor calculado para a eficiência do ciclo é de 33,3% (conversão da energia térmica para mecânica) utilizando as temperaturas mostradas na Tab.1.

### 3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

As simulações foram realizadas para a cidade Ouricuri, localizada na região semi-árida do Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil. O recurso solar na região é de boa qualidade, ou seja, alto nível de radiação direta ao longo do ano. Também apresenta pequenas variações sazonais devido à sua baixa latitude, 8° no hemisfério sul. Além disso, a região apresenta um relevo plano, de forma que pode oferecer boas condições para a implantação de uma central de geração solar termoeletrica.

Para executar as simulações, foi desenvolvido um software capaz de calcular para cada hora do dia ao longo do ano as principais variáveis operacionais da central, desde a sua entrada, radiação solar coletada, até sua saída, energia elétrica gerada. A seguir são apresentados resultados para as principais etapas do processo de simulação. Estes resultados foram divididos em uma primeira parte dedicada ao dimensionamento do sistema e uma segunda parte onde o desempenho da central é descrito.

### 3.1 Campo de Coletores

O coletor modelo LS2 foi escolhido para a simulação. Este modelo de coletor é utilizado em seis das nove plantas SEGS (SEGS II – SEGS VII) e seu desempenho foi avaliado experimentalmente em (Dudley *et al.*, 1994). As suas características são apresentadas na Tab. 2.

Tabela 2 – Características geométricas e óticas do coletor LS-2.

<b>Descrição</b>	
Comprimento	47,1 m
Abertura	5 m
Ângulo de borda	70 graus
Diâmetro do absorvedor	70 mm
Relação de Concentração	23
Eficiência óptica	0,733

O campo solar é composto por colunas de um grande número de coletores em série, interligadas em paralelo. O número de colunas determina a potência nominal da usina, 1 MWe, neste caso. Uma questão a ser respondida é quantos coletores em série são integrados ao longo de cada coluna.

Calculando-se a potência de saída de uma coluna para diferentes números de coletores em série verifica-se que o desempenho da coluna aumenta até que um determinado número de coletores seja atingido. Um pequeno número de coletores implica em uma baixa vazão de fluido térmico atravessando um comprimento curto, de modo a atingir a temperatura final ( $T_4$ ). Baixas vazões resultam em condições desfavoráveis de transferência de calor. A Fig. 3 mostra esse comportamento.

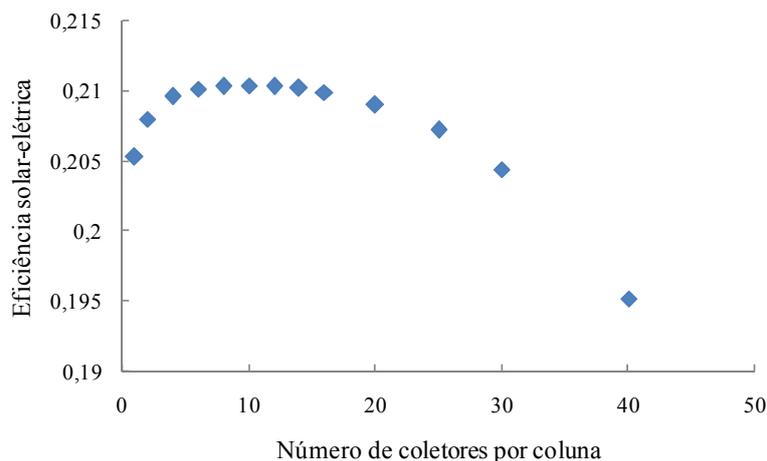


Figura 3 - Eficiência de conversão da energia solar em energia elétrica líquida, considerando o consumo de energia elétrica no bombeamento do fluido térmico ao longo da tubulação.

A redução da eficiência após a larga região de máximo ocorre devido às perdas por atrito ao longo do absorvedor, que aumentam rapidamente quando mais de 15 coletores são ligados em série. A potência elétrica líquida é a potência total do sistema menos a energia elétrica contabilizada para as perdas de bombeamento. O número de colunas é obtido somando-se a potência elétrica produzida por várias colunas de forma a atingir o valor nominal (1MWe), como mostrado na Tab. 3.

A escolha do número de colunas (4) atende ao critério de estar na região de máxima eficiência e com uma potência máxima aproximadamente 10% acima da potência nominal (1 MWe), necessária para atender a demanda dos equipamentos auxiliares.

Tabela 3 - Estimativa do desempenho do sistema para um número variável de colunas.

Número de coletores por coluna	Potência elétrica líquida (kW)	Número de colunas para 1 MWe	Número inteiro de colunas	Potência total (MWe)	Eficiência Solar-Elétrica (%)	Seleção
1	33,8	29,6	30	1,015	20,53	
2	68,6	14,6	15	1,029	20,80	
4	138,2	7,2	8	1,106	20,96	
6	207,8	4,8	5	1,039	21,01	
<b>8</b>	<b>277,4</b>	<b>3,6</b>	<b>4</b>	<b>1,109</b>	<b>21,03</b>	<b>8x4</b>
10	346,8	2,9	3	1,042	21,04	
12	416,1	2,4	3	1,251	21,03	
14	485,1	2,1	3	1,455	21,02	
16	553,7	1,8	2	1,107	20,99	
18	621,7	1,6	2	1,243	20,95	
20	689,2	1,5	2	1,378	20,90	

### 3.2 Sombreamento e distância entre coletores

Uma vez determinado o número de coletores, é necessário calcular a distância entre eles, a fim de encontrar o tamanho total do campo de coletores da central. Coletores com rastreamento ao longo do eixo Norte-Sul projetam uma sombra sobre o coletor vizinho, aumentando progressivamente à medida que a hora solar se distancia do meio dia. É necessário estimar o ângulo de rastreamento acima do qual a sombra de um coletor atinge um coletor vizinho. A Fig. 4 ilustra a interação entre os coletores em uma determinada hora solar.

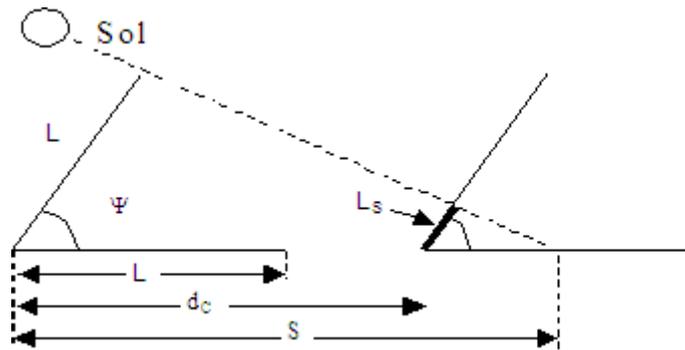


Figura 4 - Sombreamento entre linhas paralelas de coletores.

O ângulo de rastreamento ( $\Psi$ ), a abertura do coletor ( $L$ ), a distância entre os eixos de rotação dos coletores ( $d_c$ ), o comprimento da sombra projetada pelo coletor da esquerda sobre o coletor à direita ( $L_s$ ) e a sombra projetada no plano horizontal ( $S$ ) são mostrados na Fig. 5. O comprimento ( $S$ ) é dado pela Eq.(1)

$$S = \frac{L}{\cos(\Psi_{NS})} \quad (1)$$

onde ( $\Psi_{NS}$ ) refere-se ao caso específico dos ângulos de rastreamento de coletores com rastreamento em torno do eixo (N-S) dado pela Eq. (2)

$$\Psi_{NS} = \arctan \left[ \frac{\sin(\omega)}{\cos(\omega)\cos(\lambda) + \text{tg}(\delta)\sin(\lambda)} \right] \quad (2)$$

Os ângulos ( $\omega$ ), ( $\lambda$ ) e ( $\delta$ ), na Eq. (2), denotam a hora solar, a latitude e a declinação solar, respectivamente. Pode-se observar que um coletor irá começar a projetar uma sombra sobre o seu vizinho quando o comprimento ( $S$ ) é igual à distância entre os coletores ( $d_c$ ). A partir deste ponto, a sombra cresce rapidamente até cobrir toda a abertura ( $L$ ). A fração iluminada da abertura do coletor pode então ser definida como

$$FI = F_{LD} \cdot \cos(\Psi_{NS}) \quad (3)$$

onde ( $F_{LD} = d_c/L$ ) relaciona a distância entre os eixos de rotação dos coletores e a abertura. Essa equação é válida para ângulos de rastreamento maiores do que o ângulo em que um coletor começa a sombrear o próximo. Para ângulos menores  $FI = 1$ . A Fig. 5 mostra a fração  $FI$  para diferentes valores da  $F_{LD}$  para o dia mais desfavorável para a localidade considerada (dia 21 de Junho).

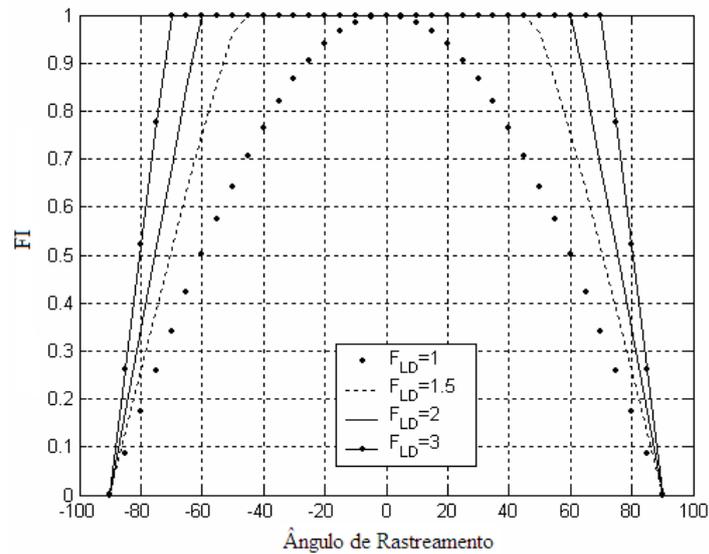


Figura 5 - Fração de área iluminada ( $FI$ ) versus ângulo de rastreamento para ( $F_{LD}$ ) igual a 1, 1,5, 2 e 3.

A partir da Fig. 5 pode-se concluir, por exemplo, que para valores de ( $F_{LD}$ ) em torno de três (3), o que significa uma distância entre os coletores igual a (3) três vezes a abertura, o fator ( $FI$ ) torna-se menor do que um (1) para ( $\Psi_{NS}$ ) maior que ( $70^\circ$ ).

O processo de seleção de parâmetros leva ao seguinte campo de coletores (Fig. 6).

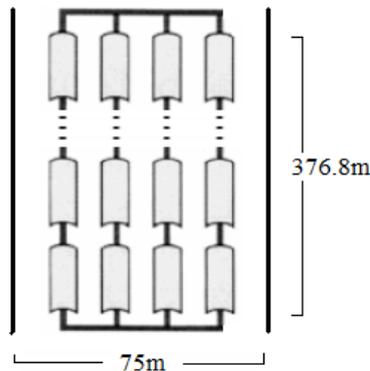


Figura 6 – Campo de coletores para uma planta de 1MWe.

A área total do campo de coletores será de  $28.260 \text{ m}^2$ , para uma área efetiva de coletores de  $7.536 \text{ m}^2$ .

## 4. RECURSO SOLAR E ENERGIA PRODUZIDA

### 4.1 Irradiância Solar

Para a implementação do modelo analítico é necessário conhecer a radiação solar horária do local. Esses valores são calculados utilizando-se um software (Oliveira *et al.*, 2002) que fornece séries temporais de radiação solar diária (ou índice de claridade diária ( $kt$ )) com base no procedimento de Matrizes de Markov (Aguiar *et al.*, 1988). Os dados de entrada consistem na média mensal da radiação solar (longo prazo), disponível no Atlas Solarimétrico do Brasil (Tiba *et al.*, 2000). Partindo-se dos valores de irradiação diária, a irradiação horária é calculada utilizando-se o modelo de Collares Pereira e Rabl (1979). O modelo analítico foi implementado através do software Mathcad®.

A Fig. 7 mostra os valores mensais da radiação direta na abertura do coletor durante o ano. Os valores mínimo e máximo obtidos são  $70$  e  $150 \text{ kWh/m}^2$ , respectivamente.

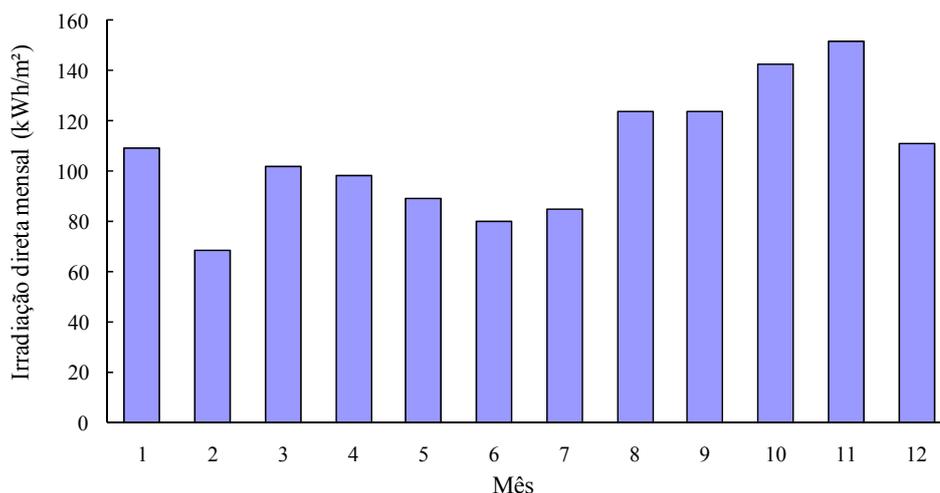


Figura 7 - Comportamento anual da irradiação direta na abertura do coletor para a Cidade de Ouricuri-PE.

A energia elétrica líquida produzida ao longo do ano é mostrada na Fig. 8. A produção máxima ocorre no mês de novembro e o mínimo em junho, com valores da ordem de 79 e 198 MWh, respectivamente.

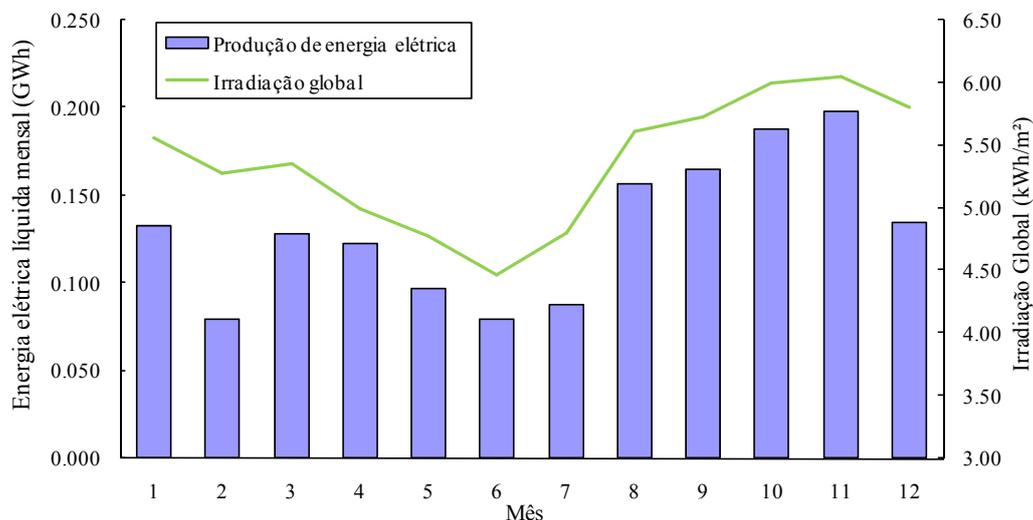


Figura 8 - Produção mensal de energia elétrica líquida durante um ano e radiação global local.

Na Fig. 8 também está mostrada a irradiação global diária, média mensal, para a cidade de Ouricuri. A produção de energia elétrica segue a variação sazonal do recurso solar. O total anual de produção de energia térmica útil é de 4,86 GWh, com uma produção correspondente de energia elétrica de 1,57 GWh.

#### 4.2 Eficiência de conversão da energia Solar para energia Elétrica

A Fig. 9 mostra uma comparação entre o comportamento da eficiência de conversão solar-elétrica (eficiência global) e irradiância direta, ambas ao meio-dia solar, durante um ano. Como esperado, a eficiência global segue bem as variações da irradiância. Valores elevados de irradiância resultam em uma produção mais eficiente de eletricidade. Para o período mostrado, ao meio dia solar, a média anual da eficiência global é de 16,2%, com valor máximo de 21,0%.

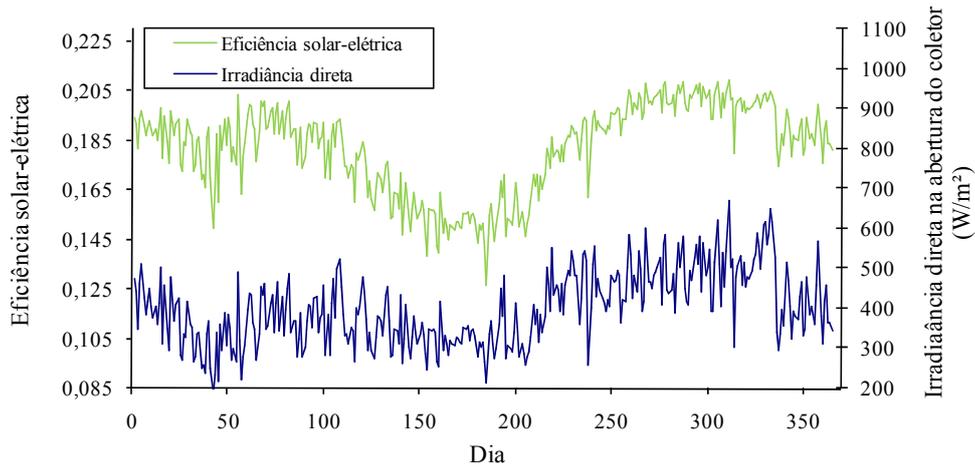


Figura 9 - Comparação entre a eficiência de conversão solar - elétrica e irradiância direta na abertura do coletor.

Pode ser visto que a eficiência global segue razoavelmente bem as variações de irradiância direta, embora haja alguns fatores internos que interferem entre a irradiância direta incidente na abertura do coletor, e a produção elétrica da central solar. Esses fatores são o modificador do ângulo de incidência e a fração de sombreamento. O primeiro apresenta uma variação de 0,85 - 1,0 ao longo do ano e o segundo não afeta os valores de eficiência mostrados na Fig. 9, uma vez que são representados para o meio-dia solar.

### 4.3 Necessidades de água

O volume diário de água, médio mensal, necessário para a condensação do vapor de água foi calculado. A temperatura de entrada da água foi considerada igual a 25 °C e a temperatura de saída dois graus abaixo da temperatura de condensação de vapor, ou seja, 38 °C (temperatura de condensação igual a 40 °C). Uma torre de resfriamento é utilizada para reduzir a temperatura da água até 25 °C. Em seguida, a água retorna em um circuito fechado para o condensador. Os valores calculados são mostrados na Fig. 10, incluindo também a média anual do volume de água diário.

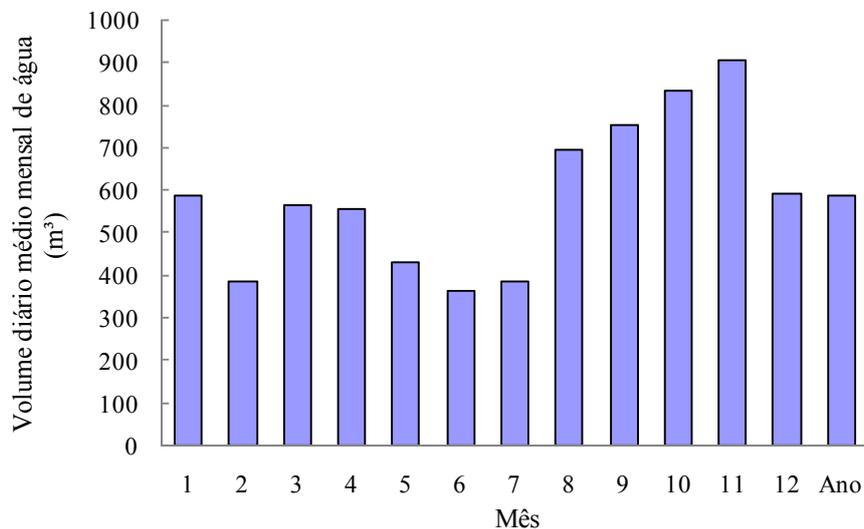


Figura 10 – Volume de água diário, médio mensal, consumido ao longo do ano.

Como a água circula em circuito fechado, é necessário repor apenas as perdas por evaporação na torre de resfriamento, em torno de 2% do volume total de água (Patnode, 2006). Assim, no mês de novembro, quando o consumo máximo de água ocorre, o sistema requer uma reposição de cerca de 18 m<sup>3</sup> por dia, que podem ser fornecidos por um sistema de bombeamento relativamente pequeno.

Os principais resultados do dimensionamento e simulação da planta estão resumidos na Tab. 4. Considerou-se a temperatura ambiente constante e igual a 29 °C, a potência elétrica líquida de 1 MWe quando a irradiância direta na abertura do coletor é igual a 700 W/m<sup>2</sup>. A eficiência da turbina é considerada constante. A irradiância direta máxima (700 W/m<sup>2</sup>) foi obtida através do modelo de Colares Pereira e Rabl (1979).

Tabela 4 – Principais resultados da simulação.

<b>Especificações</b>	<b>Valores</b>
Número de coletores em série	8
Número de colunas	4
Área total de coletores (m <sup>2</sup> )	7.536
Área total da planta (m <sup>2</sup> )	28.260
Eficiência do ciclo termodinâmico (%)	33,3
Eficiência solar-elétrica em máxima potência (%)	21,0
Eficiência solar-elétrica média anual (%)	16,2
Produção total anual de potência térmica útil (GWh)	4,86
Produção total anual de energia elétrica (GWh)	1,57
Fator de Capacidade (%)	17,9
Volume de água diário máximo requerido (m <sup>3</sup> )	18

## 5. COMENTÁRIOS FINAIS

Um modelo analítico foi utilizado para obtenção dos principais parâmetros de projeto de uma planta solar de 1 MWe de potência nominal com concentradores cilindro parabólicos. O modelo se mostrou simples e versátil para a simulação deste tipo de planta e permitiu a implementação de uma ferramenta com relativa simplicidade de uso, frente aos softwares complexos que normalmente se utilizam para estas simulações.

O sistema descrito pelo modelo analítico mostra a existência de uma eficiência constante para o ciclo termodinâmico que depende apenas das temperaturas da água ( $T_0$ ,  $T_{ev}$ ,  $T_{sh}$ ). Para as temperaturas utilizadas na simulação, a eficiência do ciclo termodinâmico foi de 33,3%.

Como foi mostrado anteriormente, a eficiência da conversão da energia solar em elétrica tem um valor máximo que depende do número de coletores por coluna. Para irradiâncias diretas da ordem de 700W/m<sup>2</sup>, o máximo é obtido para uma faixa de 6-15 coletores conectados em série. Para irradiâncias mais baixas, este número tende a ser maior que 15 coletores. Foi necessário um total de 32 coletores (4 colunas de 8 coletores em série) para que fosse obtida a potência pretendida para a planta (1 MWe) e levando em conta o recurso solar para a localidade estudada.

Foi observado que a eficiência da planta também depende dos valores de irradiância. Para uma irradiância de 700W/m<sup>2</sup> presentes na abertura do coletor, valor máximo calculado para a cidade de Ouricuri, a planta apresentou uma eficiência de 21%. A eficiência média anual foi de 16,2%, uma vez que a planta trabalha, na maior parte do tempo, com valores de irradiância inferiores a 700 W/m<sup>2</sup>.

O consumo diário de água da planta simulada apresentou um valor máximo de cerca de 18 m<sup>3</sup>, um valor baixo mesmo para uma cidade localizada no semi-árido nordestino. Considerando o consumo médio mensal de uma residência rural em torno de 120 kWh, a produção anual da planta seria capaz de suprir as necessidades de uma comunidade com cerca de 1000 famílias.

Uma característica do modelo de simulação implementado é a flexibilidade que o mesmo permite. Qualquer um dos vários parâmetros de entrada pode ser alterado, seja isoladamente ou em conjunto, para que se avalie o efeito que este(s) parâmetro(s) apresenta(m) sobre o desempenho da planta. Dada a simplicidade do modelo, é possível também considerar ou desprezar alguns efeitos, como forma de diminuir a necessidade de dados de entrada. O resultado desta flexibilidade é a possibilidade de otimizar a planta alterando seus parâmetros de entrada. Softwares disponíveis como SAM, Greenius ou TRANSYS possuem sua modelagem baseada em expressões empíricas que são fechadas ao usuário e, portanto, pouco flexíveis.

## REFERÊNCIAS

- Aguiar R. J., Collares Pereira M., Conde J. P., 1988. Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov transitions matrices, *Solar Energy*, vol. 40, n. 3, pp. 296-279.
- Collares Pereira, M., Rabl, A., 1979. Derivation of method for predicting long term average energy delivery of solar collectors, *Solar Energy*, vol. 23, pp. 223.
- Dudley, V., Kolb, G.J., Mahoney, A.R., Mancini, T.R., Matthews, C.W., Sloan, M., Kearney, D., 1994. Test Results: SEGS LS-2 Solar Collector, SAND 94-1884, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA.
- Fraidenraich N., Gordon J. M., Lima R. C. F., 1997. Improved Solutions for Temperature and Thermal Power Delivery Profiles in Linear Solar Collectors. *Solar Energy*, vol. 61, n. 3, pp. 141-145.
- Hassani, V., Price, H. W., 2001. Modular Trough Power Plants, *Proceedings of Solar Forum 2001 Solar Energy: The Power to Choose*, Washington DC, USA.
- Oliveira, C. A. A., Fraidenraich, G., Fraidenraich, N., Vilela, O. C., 2002. Desenvolvimento de um software para projeto e traçado de isolinhas de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de eletrificação rural. XI Congresso Ibérico e VI Congresso Ibero-Americano de Energia Solar, Portugal.

- Patnode, A. M., 2006. Simulation and Performance Evaluation of Parabolic Trough Solar Power Plants, Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, University of Wisconsin-Madison.
- Prabhu, E., 2006. Solar Trough Organic Rankine Electricity System (STORES). Stage 1: Power Plant Optimization and Economics. Subcontract Report NREL/SR-550-39433.
- Price, H. e Hassani, V., 2002. Modular Trough Power Plant Cycle and Systems Analysis, NREL/TP-550-31240.
- Rolim, M. M., Fraidenraich N., Tiba C., 2009. Analytic modeling of a solar power plant with parabolic linear collectors, Solar Energy, vol. 83, pp. 126-133.
- Tiba, C., Fraidenraich, N., Lyra, F.J.M., Nogueira, A.M.B., Grossi, H. G. 2000. Atlas solarimétrico do Brasil–Banco de Dados Terrestres. Editora Universitária, UFPE, 111 pgs.
- Zarza, E., Rojas, E. M., González, L., Caballero, J. M., Rueda, F., 2006. INDITEP: The first pre-commercial DSG Solar power plant. Solar Energy, vol. 80, pp. 1270-1276.

## **SIMULATION OF A 1 MWe SOLAR ELECTRIC GENERATING SYSTEM WITH LINEAR PARABOLIC CONCENTRATORS**

**Abstract.** *Decentralized generation of energy from various primaries sources has open, in the last decade, a wide space for the use of renewable energy, particularly solar thermal power and wind power. Incorporate and master this technology, in countries that have solar resource of good quality, are a goal of great importance. This work is part of the process of implementation of a first experimental solar plant in Northeast Brazil. Its object is to estimate the main operational parameters of a 1.0 MWe power station integrated by a field of parabolic linear focus concentrators, heat exchanger and a power block. An analytic model, recently developed, that provides the possibility of simulating large and small solar fields is used for that purpose. The cycle is a conventional one, working with an intermediate thermal fluid at a maximum temperature of 391°C, heat exchangers to preheat, vaporize and superheat the water-vapor fluid and a Rankine cycle for thermal to mechanic-electric energy conversion. The model uses an endo-reversible Carnot cycle that simulates properly the real Rankine cycle. The estimate of the main parameters of the 1 MWe solar power station located in Ouricuri City, Brazil, are: Collectors' area of 7,536 m<sup>2</sup>, total area of 28,260 m<sup>2</sup>, number of parabolic collectors 32 (4 lines of 8 collectors each). Annual productions of net electric and thermal useful energies are respectively: 1.57 MWe and 4.86 MWt. Simulations showed a capacity factor for the plant of 17.9% with an average annual solar to electric net efficiency of 16.2%.*

**Keywords:** Modeling, Parabolic Trough, Solar Plant.