

## DISCUSSÃO SOBRE O POTENCIAL DE USO DA GERAÇÃO HELIOTÉRMICA DE ELETRICIDADE NO BRASIL

Ana Carla Gomes Petti – anapetti@uol.com.br

Evandro Sérgio Camêlo Cavalcanti – camelo@cepel.br<sup>1</sup>

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL/Departamento de Tecnologias Especiais - DTE

Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos – leeurico@terra.com.br

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

### 2.4 Coletores de concentração e fogões solares

**Resumo.** *Apresenta-se neste trabalho discussão sobre a possibilidade de inserção da opção da geração heliotérmica de eletricidade na matriz de energia brasileira que é predominantemente hidroelétrica. Na região Nordeste do Brasil existem grandes áreas próximas ao equador, principalmente na bacia do rio São Francisco, com o mais elevado nível de radiação direta, isto é, radiação solar direta entre 1800 e 2300 kWh/m<sup>2</sup> por ano. Uma planta de geração heliotérmica com campo de coletores cilindro-parabólicos e capacidade de geração de 33 MWe foi modelada usando-se dados de radiação solar direta medidos na região do semi-árido. A partir dos resultados da simulação, foram determinados para a planta heliotérmica proposta o fator de capacidade anual e as eficiências térmicas anuais relativas às primeira e segunda Lei da termodinâmica. Pode-se concluir, que existe viabilidade técnica para a implementação desta tecnologia de conversão heliotérmica na região do semi-árido brasileiro, podendo contribuir para o processo de diversificação da atual matriz energética nacional.*

**Palavras-chave:** *Energia Solar, Tecnologias Heliotérmicas, Exergia, Matriz Energética*

## 1. INTRODUÇÃO

A energia solar é a forma mais abundante de energia disponível do mundo, mas também é uma das formas mais diluída e intermitentes (Kreider e Kreith, 1985). É uma alternativa importante para a geração de eletricidade que oferece vantagens econômicas e ecológicas. Algumas destas vantagens são: inesgotável; fonte de energia renovável e gratuita; geração de eletricidade livre de contaminantes gasosos como: CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>; níveis de poluição aceitavelmente baixos quando complementada com combustíveis fósseis, já que operaram poucas horas com esta complementação; e reduzida necessidade de área (3,0 ha/MWe) quando comparada a outras fontes renováveis (hidráulica: 55,0 ha/MWe em média) (Anderson e Ahmed, 1995), isto é, impacto ambiental mínimo ao meio ambiente.

O Brasil é um país com elevado potencial para a implementação de plantas heliotérmicas, por causa de grandes áreas com disponibilidade de radiação solar e a proximidade ao equador. Energia solar em quantidade suficiente para uso em grande escala comercial é disponível predominantemente na área de semi-árido, localizada principalmente na região Nordeste (Petti *et al.*, 2006). Esta área apresenta as melhores condições climatológicas para a instalação de plantas térmicas solares, tais como, baixa nebulosidade, precipitação reduzida, baixa umidade, alta insolação, e o mais alto nível de radiação solar direta disponível no Brasil.

---

<sup>1</sup> Endereço atual: PETROBRAS / MATERIAIS / CDBS / ATF – evandro.camelo@petrobras.com.br

Apresenta-se neste trabalho resultados dos estudos desenvolvidos visando identificar as possibilidades de inserção da geração heliotérmica de eletricidade como opção adicional para a matriz energética brasileira. Neste contexto, foram desenvolvidos a concepção, o dimensionamento e a modelagem transiente da operação e do desempenho relativo a um sistema de geração heliotérmica com coletores concentradores do tipo cilindro-parabólicos, com aplicabilidade no semi-árido nordestino, de modo a proporcionar benefícios sócio-econômicos locais. Para obter mais detalhes sobre esta modelagem recomenda-se consultar o trabalho original devido a Petti (2004).

## 2. GERAÇÃO HELIOTÉRMICA DE ELETRICIDADE

A conversão da energia solar em energia mecânica e/ou elétrica tem sido objeto de experiências por mais de um século. Em 1872, Mouchot exibiu uma imprensa acionada a vapor durante a Exposição de Paris, e em 1913 um sistema de irrigação solar começou seu breve período de operação em Meadi no Egito (Duffie e Beckman, 2006). Estes e outros desenvolvimentos utilizaram coletores concentradores para fornecer vapor para acionar estas máquinas (Duffie e Beckman, 2006) (De Laquil *et al.*, 1993). Uma interessante revisão histórica destas experiências foi apresentada por Jordan e Ibele (1956).

Durante o início dos anos 80, foram construídas várias e importantes plantas pilotos que operam satisfatoriamente, estabelecendo-se assim a viabilidade da tecnologia (Holl e Barron, 1989). Hoje mais de 354 megawatts de eletricidade são gerados através de plantas heliotérmicas comerciais nos Estados Unidos (Holl e Barron, 1989) (De Laquil *et al.*, 1993) (Grasse, 1994). Petti (2004) apresenta uma excelente revisão sobre as tecnologias heliotérmicas mais desenvolvidas, a saber: cilindro-parabólico; torre central; e disco parabólico. O aprendizado obtido a partir destas plantas, além das atividades de pesquisa e desenvolvimento, ajudou a reduzir o custo dos sistemas heliotérmicos para um quinto daquele das primeiras plantas pilotos (De Laquil *et al.*, 1993). Sem dúvida, os avanços tecnológicos futuros reduzirão ainda mais os custos, e contribuirão para melhorar os níveis de desempenho. Estes avanços, junto com as reduções de custo viabilizadas pela escala de produção, possibilitarão a construção de uma sucessão de plantas heliotérmicas, prometendo tornar o custo de geração dos sistemas heliotérmicos competitivo em relação às plantas de combustível fóssil (Petti, 2004). O ano de 2006 foi um marco na história da geração heliotérmica, devido à inauguração naquele ano da PS10, a primeira planta solar comercial Européia e última a nível mundial desde 1992, no município de Sanlúcar la Mayor, próximo à cidade de Sevilha na Espanha (Osuna *et al.*, 2006).

O desenvolvimento das tecnologias heliotérmicas está associado à otimização de diversos processos que fazem parte destes sistemas, a saber: a coleta e concentração da radiação solar; a conversão da radiação solar em calor (energia térmica); o transporte e armazenamento do calor; e a conversão final da energia térmica em eletricidade. As plantas heliotérmicas, também, podem contar com sistema de geração de eletricidade convencional complementar, ou seja, outras fontes energéticas (combustíveis fósseis, biomassa, entre outras) podem ser empregadas para garantir a produção de energia elétrica em períodos de baixa incidência de radiação solar, durante o dia, e em períodos noturnos. Desta forma, estas plantas podem operar apenas com energia solar ou com as duas fontes simultaneamente (operação híbrida). Portanto, as plantas de geração heliotérmica quando híbridizadas, apresentam operação bastante flexível, possibilitando a produção de eletricidade a qualquer hora do dia, suprimindo a demanda requerida (Demeo e Galdo, 1997).

O uso de estocagem térmica e/ou de hibridização permite que as tecnologias heliotérmicas possam ser vistas como uma alternativa de geração de eletricidade firme e “despachável”. O termo firme implica que o processo de geração de energia é altamente confiável, estando apto a gerar e suprir a demanda requerida prontamente. O termo “despachável” implica que a produção de energia pode ser desvinculada do período de insolação. Como resultado, um processo de geração de energia firme e “despachável” é de grande valor para uma concessionária, uma vez que esta pode elaborar estratégias de geração de energia capazes de aumentar o valor de seu produto. O diagrama



comportamento transiente da planta de geração heliotérmica com as características descritas neste trabalho. Adicionalmente, a cidade de Bom Jesus da Lapa localizada no oeste do Estado da Bahia, à margem direita do rio São Francisco (Figura 2), tem clima quente e seco, média anual de precipitação de 842 mm e altitude de 440 m acima do nível do mar. Como consequência, pode-se imaginar o impacto sócio-econômico positivo que a instalação de uma planta deste tipo poderá promover na região. Dentre estes benefícios, podem ser citados: a complementariedade à geração hidroelétrica existente; acréscimo da oferta de eletricidade, reduzindo-se a utilização do recurso hídrico; maior disponibilização de recurso elétrico e hídrico para atender às necessidades da atividade de irrigação; geração de empregos; fixação do homem na região; entre outros.



Figura 2. Localização de Bom Jesus da Lapa.

A irradiação solar direta em Bom Jesus da Lapa foi medida na estação climatológica do CEPEL, que foi operada pela concessionária de energia elétrica da Bahia, no período de setembro de 1996 a outubro de 1997. Vale observar que o período de medição de um ano não é bastante para que se possa determinar um ano meteorológico típico, o qual é definido por pelo menos cinco anos de medições experimentais (Petti, 2004). No entanto, estes dados foram usados para nas simulações de desempenho da planta heliotérmica que foi modelada.

O valor da irradiação solar anual, calculada a partir dos dados de medição para o sítio de Bom Jesus da Lapa como  $2.102 \text{ kWh/m}^2$ , é inferior ao valor de  $2.700 \text{ kWh/m}^2$  verificado no deserto de Mojave Desert na Califórnia (EUA). Por outro lado, é da mesma ordem de grandeza daquele que ocorre na Espanha, que varia de  $1.600$  to  $2.200 \text{ kWh/m}^2$  (Petti, *et al.* 2006), onde atualmente diversos projetos heliotérmicos estão sendo implementados. Como consequência, Bom Jesus da Lapa pode ser considerado como um sítio elegível para a implementação de plantas heliotérmicas.

#### 4. CONCEPÇÃO DA MODELAGEM DA PLANTA HELIOTÉRMICA

A modelagem da planta de geração heliotérmica, concebida por Petti (2004), foi realizada com as seguintes características: (i) campo de coletores cilindro-parabólicos; (ii) ciclo simples a vapor; (iii) capacidade de geração bruta de 33 MWe; geração líquida de 30 MWe; (iv) ausência de sistema de estocagem térmica; e (v) operação não-hibridizada. Apesar da planta de geração heliotérmica de eletricidade modelada por Petti (2004) ter parâmetros operacionais semelhantes aos da planta SEGS VI localizada na Califórnia (EUA) (Jones *et al.* 2001), foi adotado um ciclo mais simples como indicado na Figura 3 (Petti, 2004), onde pode-se observar que a planta é composta de dois subsistemas, a saber: (i) o ciclo a vapor e (ii) o campo solar.

O ciclo a vapor é simples, isto é, sem extrações e pré-aquecedores. O campo solar é formado por linhas de coletores cilindro-parabólicos. Na planta SEGS VI (Jones *et al.* 2001), cada linha de coletores cilíndrico-parabólicos apresenta entre 6 e 8 coletores, sendo este valor determinado em

função de estudos de eficiência. De acordo com esta experiência, a linha de coletores, modelada neste trabalho é formada por 6 concentradores cilindro-parabólicos. Como fluido de transferência de calor, que circula no interior dos elementos absorvedores dos coletores, foi utilizado o Therminol® VP-1 (Soluttia, 1999). Na Tabela 1 apresentam-se os principais parâmetros da planta modelada.

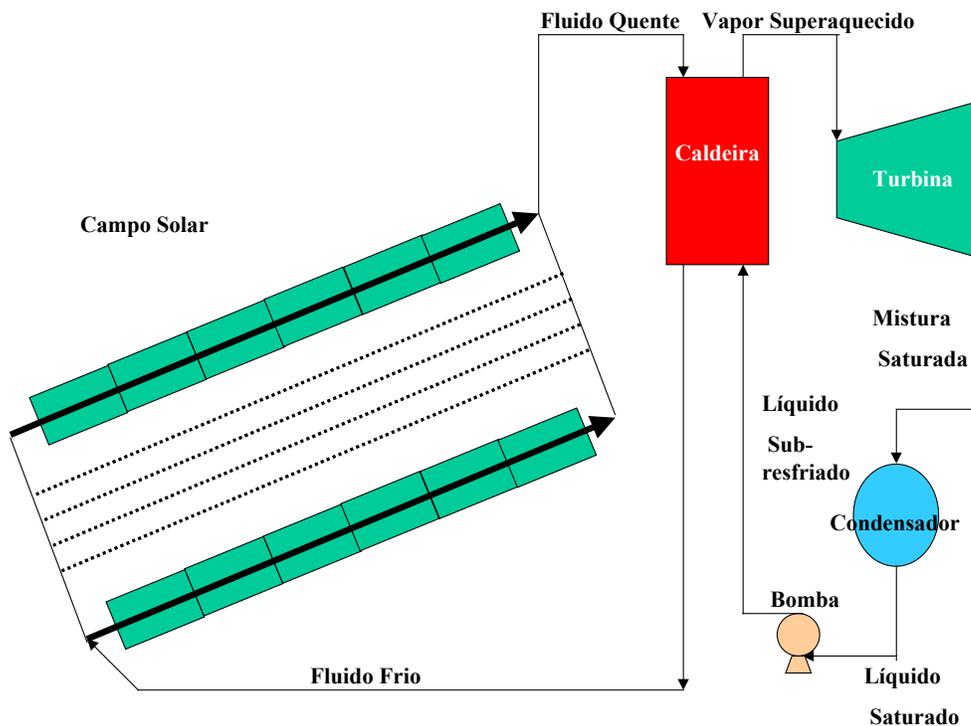


Figura 3. Ciclo térmico de potência modelado (Petti, 2004).

Tabela 1. Características da planta heliotérmica modelada (Petti, 2004).

Potência bruta de geração	33	MW
Potência líquida de geração	30	MW
Vazão mássica de vapor	35,1	kg/s
Pressão de vapor superaquecido	10	MPa
Pressão de vapor saturado	8	MPa
Eficiência do ciclo	30,1	%
Fluido de trabalho (HTF)	Therminol VP-1	-
Número de coletores por linha	6	-
Número de linhas de coletores	116	-
Número total de coletores	696	-
Temperatura do HTF na entrada do campo solar	290	°C
Temperatura do HTF na saída do campo solar	391	°C
Vazão mássica total de HTC	397,9	kg/s

O modelo utilizado na avaliação do desempenho do conceito de planta heliotérmica discutido neste trabalho foi desenvolvido com base nas equações dos módulos de componentes da biblioteca STEC (Pitz-Paal e Jones, 1998), que foram validados através da comparação de resultados calculados com o programa TRNSYS e os dados coletados durante anos de operação da SEGS VI (Jones *et al.* 2001). Por outro lado, o modelo proposto por Petti (2004) foi implementado usando o programa Microsoft Office Excel. A escolha da plataforma foi devido à simplicidade da concepção

de planta térmica que foi avaliada. O modelo foi elaborado como uma série de planilhas interligadas cujas características são descritas a seguir de acordo com Figura 4.

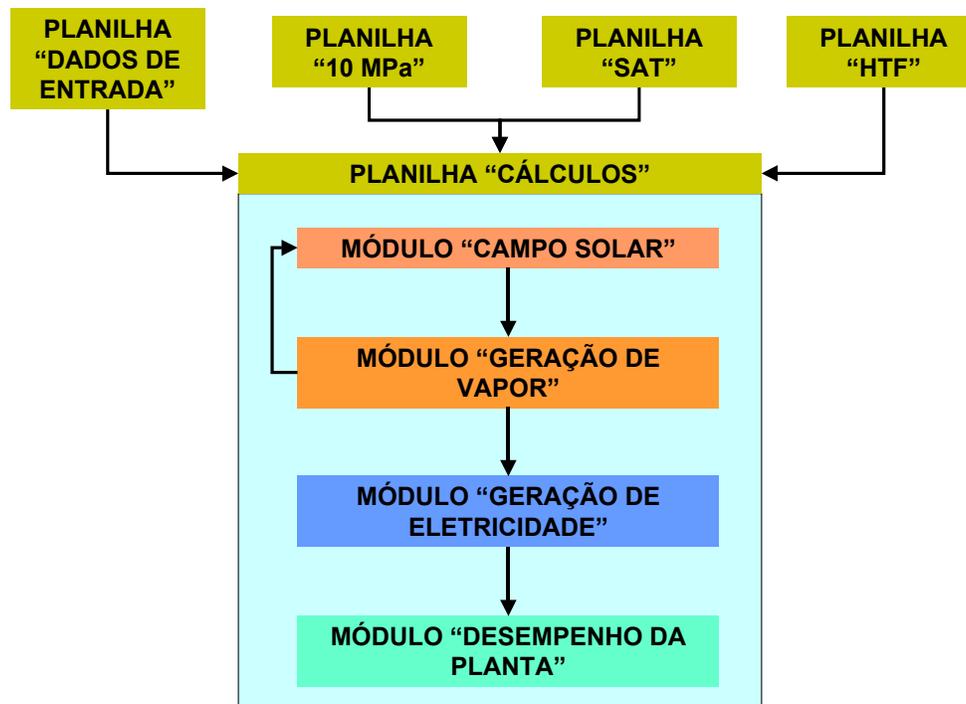


Figura 4. Diagrama de fluxo do modelo (Petti, 2004).

Na planilha “DADOS DE ENTRADA”, são introduzidos dados como: área de captação, vazão mássica de HTC, propriedades óticas, entre outros que são armazenados e mantidos constantes durante a simulação. A planilha “10 MPa” contém as propriedades termodinâmicas do vapor superaquecido – entalpia, entropia e temperatura – na condição de 10 Mpa. Estas propriedades foram usadas para calcular a potência produzida na turbina a vapor. A planilha “SAT” contém as propriedades termodinâmicas do vapor saturado na faixa de temperatura de 29 a 55°C. Estas propriedades foram usadas para calcular a potência produzida pela turbina a vapor e a pressão de condensação. A planilha “HTF” contém as propriedades termodinâmicas do Therminol® VP-1 (Soluttia, 1999). Estas propriedades foram usadas para calcular a exergia da planta heliotérmica simulada de acordo com as recomendações de Singh *et al.* (2000). Finalmente, a planilha “CÁLCULOS” faz todos os cálculos relacionados com a operação transitória da planta heliotérmica. O cálculo transitório foi dividido em quatro módulos: campo solar, geração de vapor, geração de eletricidade e desempenho da planta.

O módulo de campo solar calcula as seguintes informações: dia, hora, latitude, longitude, irradiação solar incidente, irradiação absorvida, ângulos solares, temperatura ambiente, temperatura de entrada e saída do HTC, calor útil nos coletores. Também neste módulo, as condições desejadas para a operação da planta e de geração de vapor são verificadas. A planta heliotérmica não opera se o nível de radiação solar direta incidente for inferior a  $200 \text{ W/m}^2$ , o qual foi considerado como o nível mínimo para que a inércia térmica do sistema seja vencida. Durante cada iteração para cada 30 minutos foram mantidos constantes o nível de irradiação solar e a potência gerada pela planta heliotérmica. O módulo de geração de vapor calcula a vazão mássica de vapor gerada, com base no método de efetividade, e calcula também todas as variáveis relacionadas com os processos térmicos que ocorrem no interior da caldeira. Este módulo calcula a temperatura do HTC na entrada do campo solar, para a iteração seguinte; e a temperatura do HTF na saída do pré-aquecedor. O módulo de “GERAÇÃO DE ELETRICIDADE” calcula a potência instantânea, a potência bruta e a potência líquida produzida pela planta. As quantidades de energia podem ser totalizadas em base diária ou mensal. O módulo de desempenho da planta calcula o fator de capacidade anual da planta,

e as eficiências anuais segundo a primeira e segunda Lei da termodinâmica para a planta, para o campo solar e para o ciclo térmico de potência, segundo as recomendações de Singh et al. (2000). As informações contidas em outras planilhas são usadas em diversos módulos da planilha “CÁLCULOS”.

## 5. RESULTADOS E DISCUSÕES

A partir dos estudos de simulação para a planta descrita, foram determinados: o fator de capacidade anual e as eficiências anuais relativas à primeira e a segunda lei da termodinâmica. O fator de capacidade indica a disponibilidade operacional da planta, sendo definido como a razão entre a quantidade de energia gerada e a quantidade máxima possível de ser gerada supondo que a planta funcionasse durante o mesmo período de tempo à potência máxima instalada. A eficiência da 1ª lei permite relacionar a energia que entra no sistema e que sai do mesmo, como produto e rejeito. Já a análise exergetica através da 2ª lei possibilita identificar as causas, os locais e as magnitudes de geração entrópica do processo de conversão termodinâmica da energia solar.

Na Figura 5 apresentam-se a energia elétrica média mensal produzida com a planta heliotérmica modelada por Petti (2004), considerando-se os níveis, indicados na mesma, para a energia solar direta média diária incidente sobre o campo solar de coletores cilindro-parabólicos.

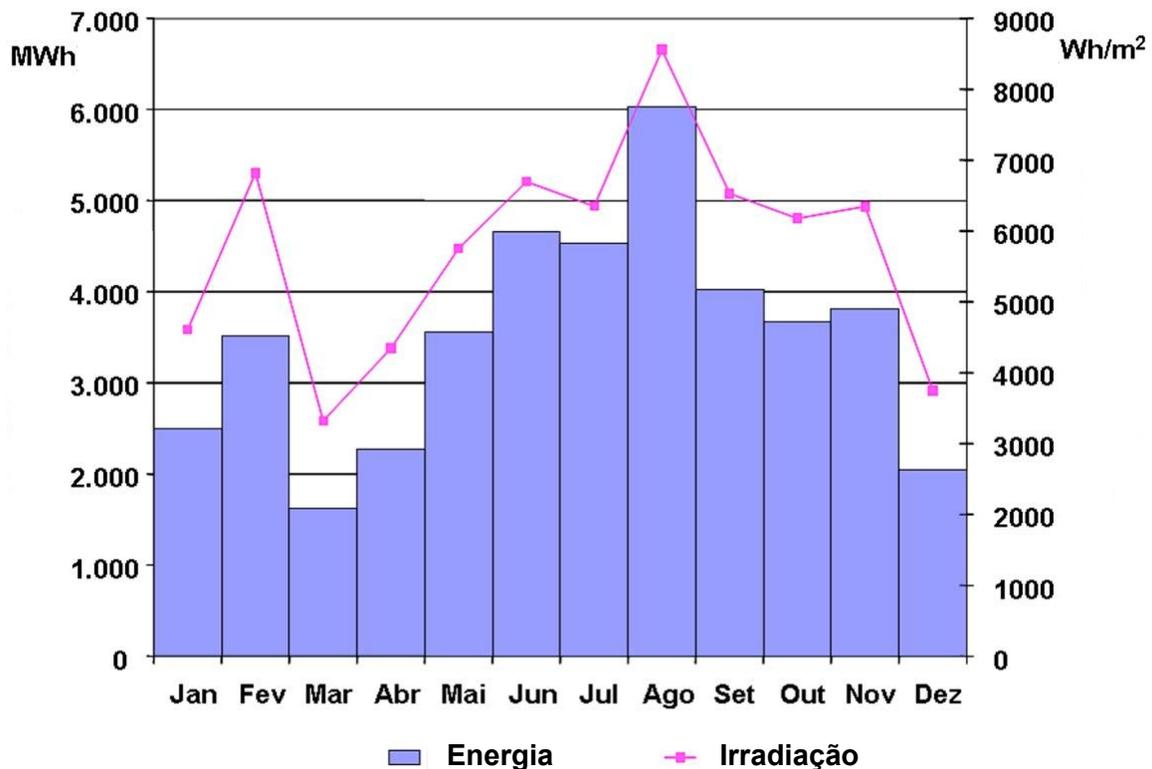


Figura 5. Energia média mensal gerada com a planta modelada (Petti, 2004).

Na Tabela 3 apresentam-se os valores calculados para o fator de capacidade anual da planta, bem como as eficiências segundo a primeira e segunda Lei da termodinâmica para a planta, para o campo solar e para o ciclo térmico de potência. Estas eficiências são os menores valores que podem ser verificados neste tipo de planta, devido ao fato de não ter sido usado hibridização ou sistema de armazenamento térmico.

Observa-se na Tabela 3 que o campo solar é mais eficiente do que o ciclo de potência, em relação a primeira lei da termodinâmica, isto significa que a maior parte da energia que entrou no campo solar, saiu do mesmo como produto. Fato diferente ocorre com o ciclo térmico de potência, no qual grande parte da energia é perdida, onde a potência calculada na simulação corresponde ao arranjo mais simples de ciclo térmico, ao contrário do que ocorre na planta SEGS VI que utiliza um

ciclo térmico mais sofisticado – com turbinas com extração, estágios de reaquecimento, aquecedores de água de alimentação – e apresenta eficiência térmica anual para a planta da ordem de 37% (Jones et al. 2001).

Tabela 3. Fator de Capacidade Anual, Eficiência para 1ª e 2ª Lei da termodinâmica

Descrição	Valor (%)
Fator de capacidade anual	14,6
Eficiência da 1ª Lei – Planta heliotérmica	15,8
Eficiência da 1ª Lei – Campo solar	54,8
Eficiência da 1ª Lei – Ciclo térmico de potência	28,8
Eficiência da 2ª Lei – Planta heliotérmica	16,6
Eficiência da 2ª Lei – Campo solar	27,3
Eficiência da 2ª Lei – Ciclo térmico de potência	61,0

## 6. CONCLUSÕES

Merece destacar que para operar uma planta de geração heliotérmica com um ciclo térmico de potência com maior eficiência seria necessário menor área de captação de energia solar para o campo solar, uma vez que a demanda térmica da caldeira seria reduzida. Adicionalmente, a eficiência térmica global da planta térmica seria maior.

Pode-se ser observar na Tabela 3 que o campo solar tem a menor eficiência segundo a segunda lei da termodinâmica, podendo-se concluir que ocorre no campo solar a maior ineficiência na conversão de energia na planta heliotérmica, o que significa que este componente deve ser visto como potencial candidato para efficientização. Este resultado indica que concentradores solares mais eficientes devem ser objeto de pesquisa e desenvolvimento, principalmente a eficiência ótica destes equipamentos. A redução de perda ótica permitirá uma melhor captação da energia solar, tornando possível a obtenção de temperaturas mais elevadas com menores áreas de captação, reduzindo as perdas de energia e exergia.

Levando-se em conta os dados de irradiação solar direta para a região do semi-árido brasileiro, pode-se concluir deste trabalho que existe viabilidade técnica para a implantação desta tecnologia heliotérmica de conversão solar elétrica naquela região brasileira, o que trará com certeza impacto sócio-econômico positivo para o local e podendo contribuir no todo, para o processo de diversificação da atual matriz energética nacional.

Finalmente, pode ser concluído dos resultados obtidos para Bom Jesus da Lapa que para aumentar o fator de capacidade das plantas heliotérmicas deverá ser considerado, na concepção do projeto, a possibilidade de se utilizar hibridização e/ou armazenamento térmico. No futuro serão incluídos no modelo descrito neste trabalho as opções de operação híbrida e/ou armazenamento térmico. Pretende-se, também, desenvolver análise técnica e econômica da inserção da geração heliotérmica como opção alternativa para a complementariedade da geração elétrica no nordeste brasileiro, levando em conta as condições hidrológicas e de interligação do sistema elétrico brasileiro.

## REFERÊNCIAS

- Anderson, D. e Ahmed, K. 1995. The Case for Solar Energy Investments. World Bank. Technical Paper Number 279 - Energy Series, xi+16p., 1995.
- Cordeiro, P. 1998. START Mission to Brazil-START Report 3/97, SolarPACES, Fevereiro 1998.

- De Laquil, P.; Kearney, D.; Geyer, M. e Diver, R. 1993. Solar-Thermal Electric Technology. Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity, Ed. T.B. Johanssen *et al.*, Island Press, 1993, Chapter 5, pp 213-296.
- Demeo, E.A., Galdo, J.F. 1997. Renewable Energy Technology Characterization, EPRI and U.S. Department of Energy, Topical Report TR-109496.
- Duffie, J. A. e Beckman, W. A. 2006. Solar Engineering of Thermal Processes, 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley & Sons, xix + 908p, 2006.
- Grasse, W. 1994. Solar Thermal Power and Solar Chemical Energy Systems, SolarPACES Program of the International Energy Agency, The Franklin Company Consultants Ltd., Birmingham, 52p., September 1994.
- Holl, R.J. e Barron, D.R. 1989. Status of Solar-Thermal Electric Technology, EPRI Report GS-6573 (H.G.H. Enterprises, Laguna Hills, CA), Electric Power Research Institute, Palo Alto (CA), 1989.
- Kreider, J.F. e Kreith, F. 1985. Solar Heating and Cooling: Engineering, Practical Design and Economics, McGraw-Hill, New York, pp. 7-8, 1985.
- Jones, S.A., Pitz-Paal R., Schwarzbözl, P., et al. 2001. TRNSYS Modeling of the SEGS VI Parabolic Trough Solar Electric Generating System. Proceedings of Solar Forum 2001 Solar Energy: The Power to Choose, 2001 21-25 April Washington, D.C., USA, 2001.
- Jordan, R.C. e Ibele, W.C. (1956). Mechanical Energy From Solar Energy, Anais do World Symposium on Applied Solar Energy, Stanford Research Institute, Menlo Park (CA), EUA, p.81, 1956.
- Osuna, R.; Olavarria, R.; Morillo, R.; et al. 2006. PS10, Construction of a 11 MW Solar Thermal Tower Plant in Seville, Spain. Proceedings of the 13<sup>th</sup> SolarPACES Symposium in CD-Rom, paper A4-S3, 8p.
- Petti, A.C.G. 2004. Modelagem de uma Planta de Geração Heliotérmica de Eletricidade Localizada no Semi-árido Nordeste Brasileiro, Tese de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 213p.
- Petti, A.C.G.; Camelo Cavalcanti, E.S.; Bastos, L.E.G. 2006. Assessment of solar thermal power plants for the Brazilian northeast region, Proceedings of the 13<sup>th</sup> SolarPACES Symposium in CD-Rom, paper B5-S3, 8p.
- Pitz-Paal, R., Jones, S. 1998. A TRNSYS Model Library for Solar Thermal Electric Components (STEC), SolarPACES Technical Report, N° III – 4/98, 1998.
- Sinng, N., Kaushik, S. C., Misra, R. D. 2000. Exergetic Analysis of a Solar Thermal Power System, Renewable Energy. 19:135-143. 2000.
- Solutia. 1999. Solutia Technical Bulletin 7239115B, Therminol® VP-1, Vapor Phase/Liquid Phase Heat Transfer Fluid. Solutia, 1999.

## DISCUSSION ABOUT THE POTENCIAL USE OF CONCENTRATED SOLAR POWER TECHNOLOGIES IN BRASIL

**Abstract.** *The main objective of this paper is to analyze the technical feasibility of introducing concentrated solar power (CSP) technologies in the Brazilian electrical energy matrix which is predominantly hydroelectric. In the Brazilian Northeast region there are large areas close to the equator, mainly in the São Francisco river basin, with the highest solar direct radiation, that is, solar direct radiation between 1800 and 2300 kWh/m<sup>2</sup> per year. A typical 33 MW<sub>e</sub> solar power plant based on parabolic trough technology has been modelled using direct solar radiation data that were measured in the semi-arid region. The annual capacity factor and the annual efficiencies from the first and second laws of thermodynamics were determined from the results obtained with*

*the simulations. Indeed, the solar energy resources available in the Brazilian Northeast region and the results obtained indicate the technical feasibility of this CSP technology to be implemented in Brazil, what will contribute in the future to diversify the Brazilian electrical energy matrix.*

**Keywords:** *Solar Energy, CSP Technologies, Exergy, Energy Matrix*