



PREVISÃO DE PERFORMANCE ENERGÉTICA POR MEIO DE SIMULAÇÃO TRANSIENTE DE UM SISTEMA CSP COM TORRE CENTRAL INTEGRADO A ATIVIDADES AGROINDUSTRIAIS

Pedro Henrique Silva Bezerra¹, Odivaldo José Seraphim² & Celso Eduardo Lins de Oliveira³

RESUMO: Para demonstrar o funcionamento da tecnologia CSP, é de fundamental importância a simulação dos processos por meio de ferramentas computacionais, que permitem a previsão do desempenho energético. O objetivo dessa pesquisa foi obter o desempenho energético de uma usina CSP com receptor central, com capacidade instalada de 70kWe, integrado a sistemas agroindustriais em São Paulo. A pesquisa se baseou na criação de um modelo de sistema CSP para geração de eletricidade, acoplados a um Matadouro e Laticínio. As análises foram realizadas com o uso da ferramenta computacional TRNSYS. Os resultados prévios oriundos das simulações foram em resposta à irradiação solar. Nas melhores épocas do ano em que a radiação é mais frequente e intensa, foi-se registrado valores acima de 1000 W/m², sendo que durante o ano, o valor integral obtido foi 1.957,73 kW/m²/ano. Os valores de eficiência óptica obtidos alcançaram a ordem de 45%. A eficiência média de conversão do calor proveniente do sol em eletricidade foi de 18%. Durante o dia, a potência líquida da turbina foi de aproximadamente 30 kW_e, sendo que o valor de geração anual integrado foi na ordem de 108.618 kWh/ano. Ao aplicar os valores de geração obtidos no perfil do consumo do Laticínio, os resultados apontaram que em um dia de geração, considerável bom com 10 horas de irradiação, a planta supriria 60% da demanda energética. O sistema pode ser analisado como uma alternativa de eficiência energética com aplicação da resolução ANEEL 482/2012.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar Concentrada; sistema CSP com torre central; desempenho energético.

ENERGY PERFORMANCE PREDICTION BY TRANSIENT SIMULATION OF A CSP SYSTEM WITH CENTRAL TOWER INTEGRATED TO AGRO-INDUSTRIAL ACTIVITIES

ABSTRACT: To demonstrate the operation of CSP technology is fundamental to simulate the processes by computational tools, which allow prediction of energy performance. The objective of this research was to obtain the energy performance of CSP plant with central receiver, with installed capacity of 70kWe, integrated an agribusiness systems in São Paulo. The research was based on the creation of a CSP system model for electricity generation, coupled to a Slaughterhouse and Dairy. The analyzes were performed with the use of the computational tool TRNSYS. The previous results from the simulations were in response to solar irradiation. In the best times of the year when radiation is more frequent and intense, values above 1000 W/m² were recorded, and during the year the total value obtained was 1.957.73 kW/m²/year. The average heat conversion efficiency from the sun into electricity was 18%. During the day, the net power of the turbine was approximately 30 kW_e, and the integrated annual generation value was in the order of 108.618 kWh/year. By applying the generation of values obtained in Dairy consumption profile, the results showed that in one generation day, with 10 hours of irradiation being considered a good sun span, the plant would supply 60% of the energy demand. The system can be analyzed as an alternative energy solution with the application of ANEEL resolution 482/2012.

KEYWORDS: Concentrated Solar Power; CSP system with central tower; performance.

1 INTRODUÇÃO

O uso de combustíveis fósseis como fonte de energia vem sendo contestado nas últimas décadas. A busca por novas fontes de energia se justifica pela crescente demanda ocasionada pelo desenvolvimento social, demográfico, urbano e industrial ocorrido nos últimos anos. Quase todas as medidas de mitigação do efeito estufa e de estabilização desse cenário são caracterizadas

pela introdução de tecnologias energeticamente eficientes, para o fornecimento de energia oriunda de fonte renovável.

A fim de alcançar uma matriz energética madura, segura e diversificada, o governo se vê obrigado a seguir em decisões que possibilite a geração distribuída por fontes renováveis. A oscilação crescente do custo da energia elétrica faz com que agroindústria nacional promova novos métodos de produção alternativos, que sejam favoráveis ao meio ambiente, seja no fornecimento de energia renovável para os requisitos de processo, ou seja no uso mais eficiente dos meios de produção, a fim de

^{1 2} Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” FCA/Botucatu. Depto: Engenharia Rural E-mail: bezerra_ph@hotmail.com ; seraphim@fca.unesp.br

³ Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Biossistemas. E-mail: celsooli@usp.br

umentar a sua própria competitividade e sustentabilidade.

O Brasil possui condições naturais de geração de energia por fonte solar em função dos altos índices de radiação solar direta e mesmo em locais onde a incidência é menor, a aplicação de sistemas solares térmicos ainda é possível (ANEEL, 2016).

O agronegócio brasileiro é responsável por uma importante fração de toda riqueza produzida. Por meio da exportação de produtos com bons valores no mercado internacional e de grande escala de produção. Isso evidencia um setor que demanda grande quantidade de energia.

Diversos setores agroindustriais foram identificados com condições favoráveis para a aplicação da energia solar. A utilização térmica da energia solar é usualmente restrita a sistemas de água quente domésticos de até 60°C. No entanto, a demanda de calor em processos agroindustriais possui um potencial considerável para utilização da mesma (KALOGIROU, 2003). O uso de energia por unidade de produção é o indicador mais comum para avaliar tendências e desenvolvimentos em eficiência energética (RAMÍREZ et al., 2006).

A geração de energia através da tecnologia CSP é considerada uma alternativa promissora para os gestores de políticas públicas, com o propósito de garantir energia limpa obtida por meio de tecnologias sustentáveis, principalmente em regiões semidesérticas, com níveis privilegiados de irradiação solar ($> 2,000 \text{ kWh} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) (SOUZA; FERREIRA, 2016). Desde 2006, a inserção de energia solar térmica vem aumentando significativamente em uma média de 17,6 pontos percentuais ao ano, alcançando uma produção de 7,712 GWh em seu campo solar em 2014, com uma área total instalada de 11,01 milhões de m^2 de coletores instalados (IEA, 2016).

A construção de usinas CSP se mostram uma alternativa promissora, capaz de contribuir em quantidades relevantes para as necessidades energéticas do setor agroindustrial brasileiro (MAAG et al., 2014). Diante da variedade de consumidores agroindustriais que precisam de fornecimento confiável de energia e calor, aplicações de geração de eletricidade ou cogeração a partir de energia solar concentrada representam uma solução adequada.

No entanto, os custos de energia elétrica gerada por meio de termosolares são superiores a outras fontes de geração, e o processo de consolidação da tecnologia solar está estreitamente relacionado ao desenvolvimento científico nesse campo de investigação e na maturidade da indústria nacional, em estar apta a suprir a demanda de materiais e componentes necessários para construção e implementação de protótipos e usinas CSP. Por esse motivo, há a necessidade, de forma emergencial, da elaboração de estudos que ofereçam fundamentos científicos para investidores e para que o governo promova políticas específicas de incentivos ao estabelecimento da tecnologia CSP no Brasil.

Para demonstrar o uso e o funcionamento da tecnologia CSP, é de fundamental importância a simulação dos processos por meio de ferramentas computacionais, que permitam a previsão do desempenho energético, técnico e econômico das soluções empregadas, proporcionando melhor base para as decisões de investidores e gestores públicos.

O objetivo dessa pesquisa foi elaborar uma simulação transiente para obtenção de performance e desempenho energético de uma usina CSP com receptor central, com capacidade instalada de 70kW_e e com cogeração de calor integrado a sistemas agroindustriais no interior de São Paulo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 MÉTODOS DA SIMULAÇÃO E PREMISAS

A pesquisa se baseou na criação de um modelo de sistema CSP, para geração de eletricidade e calor, acoplados a distintas atividades agroindustriais da cadeia produtiva brasileira, que passaram pelas seguintes etapas:

- Identificação das atividades agroindustriais a qual a tecnologia CSP melhor se adequa;
- Premissas, caracterização técnica e valores utilizados em cada submodulo;
- Previsão de desempenho, em termos de produção anual de geração de eletricidade;
- Eficiência da conversão de energia.

O conceito do modelo da planta CSP foi formado por meio de um conjunto de submodelos: o campo de heliostatos, o receptor da torre e o bloco de potência. Esses modelos de componentes individuais, combinados no mesmo sistema, permitiram a previsibilidade do comportamento da planta como um todo, em resposta ao recurso solar transiente.

As análises foram realizadas com o uso da ferramenta computacional TRNSYS (www.trnsys.com), por meio de simulações dos sistemas CSP em resposta à irradiação solar variável no tempo e à dinâmica de operação do consumidor agroindustrial. Por fim, foram identificados os principais parâmetros e premissas dimensionais do sistema, bem como os indicadores de desempenho.

Contudo, a fim de diagnosticar os processos agroindustriais que mais se adequam, do ponto de vista energético, foi realizado o levantamento das principais atividades agroindustriais em função das características dos processos, de parâmetros técnicos e não técnicos como, por exemplo, da forma de energia consumida, da demanda, qualidade, quantidade e frequência, como também do volume de produção/exportação anual. Os parâmetros de maior importância considerados foram a demanda de calor; temperaturas de processos; tempo e volume de produção e as variações sazonais de cada matéria prima analisada durante o ano.

2.2 SIMULAÇÃO TRANSIENTE TRNSYS

Os valores de desempenho energético das simulações modeladas foram obtidos por meio da ferramenta TRNSYS. O modelo criado prediz uma saída de energia anual proporcional aos valores de entrada, do recurso solar e ao rendimento de cada componente (NREL, 2013).

A eficiência óptica do campo solar de heliostatos foi obtida por meio da utilização da ferramenta Tonatiuh. A ferramenta foi utilizada na simulação do desempenho óptico do sistema de concentração solar. O método da simulação numérica foi Monte Carlo. A distribuição espacial dos heliostatos no campo solar no campo foi otimizada em razão do movimento solar (ângulo de azimute e ângulo zenital), da geometria do campo (proximidade máxima e mínima da torre), altura da torre e configuração do receptor. A matriz de eficiência óptica obtida foi usada com entrada no submódulo campo solar.

2.3 ESCOLHA DA LOCALIDADE

O local escolhido para obtenção dos valores do recurso solar foi Pirassununga, latitude 21°59'46" S, longitude 47°25'33" O e altitude de 627 metros. Os dados meteorológicos foram obtidos na Estação Climatológica e Processados no Laboratório de Eficiência Energética e Simulação de Processos – LEESP, situado na FZEA – USP.

Os dados de radiação solar foram coletados por meio de um pireliômetro, integrados a cada hora, ordenados em tabela, de forma compatível para que a ferramenta computacional utilizada entendesse a entrada. Com isso, caracterizou-se um ano típico meteorológico, com dados solarimétricos de 2015.

2.4 APLICAÇÕES AGROINDUSTRIAIS

Foram identificadas aplicações agroindustriais com potencial de serem beneficiadas com o acoplamento de tecnologias CSP, por meio de parâmetros energéticos operacionais, análise do consumo energético, volume de produção sazonal e valor de mercado da matéria-prima processada. A Tabela 1 apresenta os valores de consumo energético e produção das atividades agroindustriais analisadas.

Tabela 1 - Perfil de consumo das atividades analisadas.

	CP*	Diário	Mensal
Matadouro	70 cabeças/dias	21 MWh	630 MWh
Laticínio	10.000 l/dia	500 kWh	15 MWh

*Capacidade de processamento por dia/mês.

O consumo energético das atividades agroindustriais foi obtido de unidades típicas em escala de produção comercial. A demanda energética foi discriminada em função da unidade da matéria prima processada (cabeça de gado e litro de leite). A quantidade de energia requerida foi distribuída durante o ano em valores mensais e diários.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO

As simulações da planta CSP foram realizadas ao longo de um período de um ano. O sistema modelado opera em função da radiação solar direta disponível. A Figura 1 apresenta os valores de radiação direta em Pirassununga no ano de 2015. Nas melhores épocas do ano em que a radiação é mais frequente e intensa, foi-se registrado valores acima de 1000 W/m², sendo que durante o ano, o valor integral obtido foi 1.957,73 kW/m²/ano.

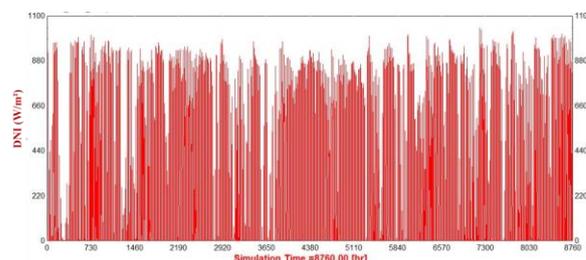


Figura 1 - Disponibilidade de irradiação solar direta em Pirassununga – SP no ano de 2015.

O modelo de planta baseia-se no conceito de planta piloto de torre central, com capacidade instalada de 70 kWel acoplado a atividades agroindustriais brasileira, proposto anteriormente por Maag et al. (2014). Nessa etapa da pesquisa, foi modelado no TRNSYS, um sistema de geração amplamente utilizado na indústria CSP. O modelo (Figura 2) consistiu de módulos dimensionados a atender as exigências termodinâmicas do ciclo Rankine Orgânico e do sistema CSP proposto.

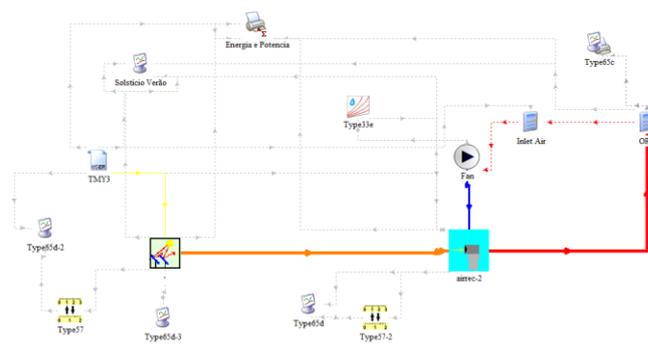


Figura 2 - Fluxograma esquemático da planta (TRNSYS).

3.2 CAMPO SOLAR

O campo solar adotado foi dimensionado a fim de fornecer energia térmica para um bloco de potência com capacidade nominal 70 kWel. O campo solar modelado foi constituído por 140 heliostatos, com área de 9m² cada. A Tabela 2 apresenta as definições do campo solar admitidas como entrada nos parâmetros.

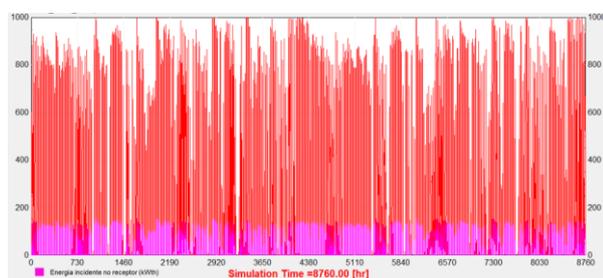
Tabela 2 - Definições do campo solar.

Área de reflexão	1.260 m ²
Modelo Heliostato	HelioCa
Número de heliostatos	140
Área heliostato	(3x3) 9 m ²
Descrição do heliostato	Metal – Vidro e Espelho
Refletividade	95%
Energia de inicialização	0.025 kWe-hr
Energia de rastreamento	0.055 kWe
Veloc. Max. vento	15 m/s
Erro padrão	0.65 mrad
Erro cônico	4.32 mrad

Como parâmetro de construção dos valores de entrada do campo solar, a matriz de eficiência ótica do campo foi obtida em função da trajetória solar (data e hora), ângulo azimutal e zenital, bem como do número de heliostatos. A matriz de eficiência foi construída por uma simulação numérica ótica, por meio da utilização da ferramenta Tonatiuh. Os valores de eficiência ótica obtidos alcançaram a ordem de 45%. O desempenho de cada variável se formou em função de parâmetros: (i) efeito cosseno, (ii) sombreamento e bloqueio; (iii) derramamento; (iv) atenuação, poeira e refletividade dos espelhos.

Além do número de unidades, a potência requerida para o rastreamento solar realizado por cada unidade e a energia de arranque demandada pôde ser inserida, permitindo o cálculo da energia parasitária total do CS, bem como outros parâmetros operacionais (Tabela 2).

A Figura 3 apresenta os valores de irradiação solar direta (em vermelho) e os valores de energia térmica de saída do campo solar disponibilizada no receptor central (em magenta).

**Figura 3 – Energia térmica disponível ao receptor.**

Num dia típico de céu aberto, a energia térmica disponibilizada ao receptor foi na ordem de 140 kWt.

3.3 RECEPTOR

O modelo do receptor dimensionado foi plano e aberto. O fluido térmico ar natural. O receptor opera equipado com um ventilador, que força a passagem do ar com fluxo constante de 1,22 kg/s. A queda de pressão no receptor considerada foi de 60 mbar. A temperatura

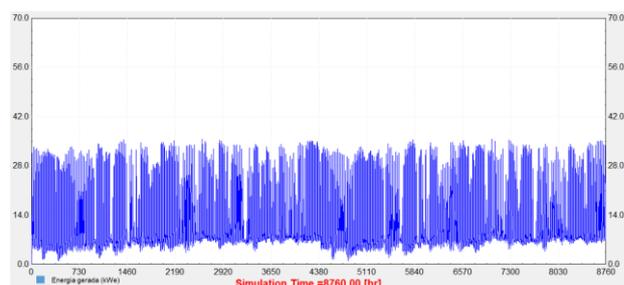
máxima de dimensionamento foi 500° C e a mínima de operação 210°C. Cerca de 38% da energia incidente era de fato disponibilizada ao bloco de potência. O ar quente de saída do receptor alimentou com energia térmica a turbina, onde ocorre a conversão em eletricidade. Gamil et al. (2013), que avaliaram o desempenho de um sistema CSP com torre central de pequena escala na Malásia, os resultados apontaram a necessidade de aumentar a área do campo solar, a fim de disponibilizar mais energia térmica ao bloco de potência.

A partir da simulação com o TRNSYS, o campo de heliostatos fornece 7.5 kW como valor máximo no dia 361 (27 de dezembro) no meio-dia solar. Essa quantidade de energia pode ser maior com o aumento da área refletiva total do campo de heliostato.

3.4 BLOCO DE POTÊNCIA

Os parâmetros usados como referência para a modelagem do ciclo foram disponibilizados pelo fornecedor do bloco de potência, com especificações do ciclo de Rankine com fluidos orgânicos (ORC). A eficiência média de conversão do calor proveniente do sol em eletricidade do ciclo foi 18%. Segundo Giovanelli, 2015, os ORCs apresentam baixa eficiência devido a razões termodinâmicas intrínsecas (pequena diferença entre as fontes térmicas a quente e a frio). A central elétrica Saguaro, no Arizona, com capacidade instalada de 1MWe, apresentou valores de eficiência solar para eletricidade de 12,1% (ponto de design) (GIOVANELLI, 2015). Segundo Ferrara et al. (2014), que comparou plantas pequenas com ORC operando com diferentes fluidos térmicos, relatou baixa eficiência do ciclo, devido a baixas temperaturas, mesmo com regeneração. No entanto, com regeneração, superaquecimento e aquecimento, foram obtidos resultados interessantes com eficiência de ciclo na ordem de 20%.

Durante o dia, a potência da turbina foi de aproximadamente 30 kWe (Figura 4), sendo que o valor de geração anual integrado foi na ordem de 108.618 kWh/ano. Cerca de 57% da energia gerada no bloco era consumida pelo próprio sistema CSP. O ventilador usado para forçar o fluxo de ar no receptor consumiu 55% da energia demanda pelo sistema.

**Figura 4 - Energia gerada pelo bloco de potência**

A fim de esclarecer o comportamento da planta durante as condições extremas que ocorrem ao longo de um ano, os resultados foram demonstrados em dois

representativos dias: solstício de verão e inverno (Figura 5).

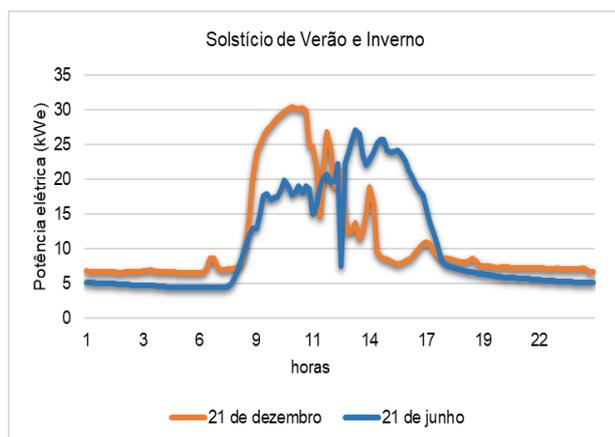


Figura 5 - Energia gerada nos dias 21 de junho e dezembro (solstícios).

Os valores de geração elétrica no dia mais longo do ano atingiu o valor máximo de 30,36 kWe, próximo as 12 horas. No entanto, no decorrer do dia, a oscilação da geração ocorreu devido a predominância de nuvens e possivelmente chuva, típico nessa época do ano em Pirassununga.

Na Figura 6, pode-se notar a fração da energia de fato convertida em eletricidade, diante da disponibilidade do recurso solar. Além de apresentar ausência de radiação no final do dia, possivelmente por eventuais nuvens.

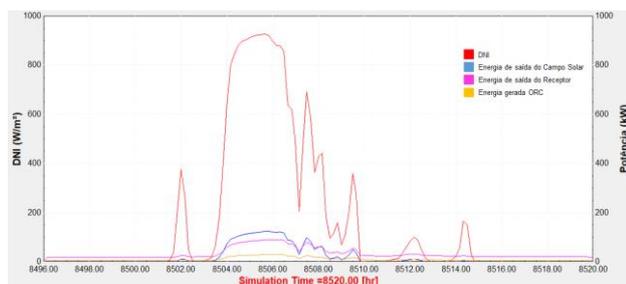


Figura 6 - Energia disponível nos componentes do ciclo (solstício de verão).

Já no solstício de inverno (Figura 7), a geração elétrica alcançou um valor máximo de 26,85 kWe. Porém, o perfil da geração foi uniforme em relação ao dia de verão em comparação. Dias típicos de inverno na região de Pirassununga são mais propícios a geração de eletricidade por fonte solar concentrada, principalmente em função da predominância de dias típicos de céu aberto.

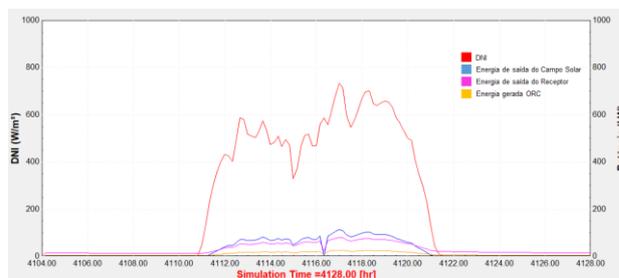


Figura 7 - Energia disponível nos componentes do ciclo (solstício de inverno).

Por fim, os perfis de consumo de cada atividade agroindustrial descrita na Tabela 1 foram associados aos valores de geração do sistema. No entanto, o valor de consumo do Matadouro está acima da capacidade de geração do bloco de potência dimensionado. Toda energia gerada atenderia 1,4% da demanda, porém a aplicação do calor residual da turbina no aquecimento de água usada diariamente na higienização é considerada como opção. Para Mekhilef; Saidur; Safari (2011), a aplicação de calor direto a processos como os analisados, aumenta a eficiência energética. Ao aplicar os valores de geração obtidos no perfil do consumo do Laticínio, os resultados apontaram que em um dia de geração, considerável bom no sentido de céu aberto, com 10 horas de irradiação, a planta supriria 60% da demanda energética. Para esse caso analisado, também existe a possibilidade do direcionamento do calor residual da turbina ser aplicado no processo, como a pasteurização do leite que demanda grande parte da energia do processo.

4 CONCLUSÕES

O sistema dimensionado apresentou valores de geração e eficiência que já eram esperados, demonstrando que a disponibilidade de irradiação solar direta em Pirassununga é satisfatória para sistemas de geração CSP. A relativa baixa quantidade de energia gerada se deve ao número reduzido de heliostatos no campo solar. A ideia de manter o mesmo número de heliostatos do projeto base da planta solar, foi com o intuito de prever possíveis problemas dimensionais. Faz-se necessário, portanto, a readequação do múltiplo solar, a capacidade nominal de geração do bloco de potência. O ventilador acoplado ao receptor agrava o consumo do sistema e precisa ser redimensionado. Esse fato se teve devido a utilização de dados dimensionais do receptor solar, fidedigno ao projeto, que possui uma capacidade dimensional acima dos demais componentes do sistema.

O sistema CSP pode ser analisado como uma alternativa de eficiência energética com aplicação da resolução ANEEL 482/2012, assumindo o aproveitamento do calor residual como calor de processo, o que tornará mais provável a viabilidade econômica do sistema. A Resolução permite que consumidores produzam sua própria energia por fonte solar e criem um crédito a ser descontado no valor final da fatura de energia.

Para a melhoria do modelo, algumas etapas subsequentes deverão ser alcançadas:

- Um combustor auxiliar deverá ser adicionado ao modelo, de modo a garantir a geração mesmo em momentos em que não há a disponibilidade de radiação.
- O calor de condensação obtido do ciclo deverá ser reaplicado no caso agroindustrial analisado, afim de se obter melhores valores de eficiência energética.
- Um sistema de armazenamento térmico pode ser uma alternativa viável a ser incorporada no modelo.

5 AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro ao projeto.

Ao Grupo de Pesquisa em Reciclagem, Eficiência Energética e Simulação de Processos da USP- GREEN pelo apoio no desenvolvimento dessa pesquisa.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **DESPACHO Nº 88**. 2016. [s.l: s.n.].

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 482 de 17 de Abril de 2012.

FERRARA, F., GIMELLI, A.; LUONGO, A. Small-scale Concentrated Solar Power (CSP) Plant: ORCs Comparison for Different Organic Fluids. **Energy Procedia**, 45, pp.217-226. 2014

GAMIL, A., GILANI, S. AND AL-KAYIEM, H. Simulation and Evaluation of Small Scale Solar Power Tower Performance under Malaysia Weather Conditions. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 16, p.012031. 2013.

GIOVANNELLI, A. State of the Art on Small-Scale Concentrated Solar Power Plants. **Energy Procedia**, 82, pp.607-614. 2015.

IEA – International Energy Agency. **Energy Technology Perspectives 2016**. 2016. Available in: <<http://www.iea.org/newsroomandevents/pressreleases/2016/june/etp2016-cities-are-in-the-frontline-for-cutting-carbon-emissions.html>>. Access in: 16 nov. 2016.

KALOGIROU, S. A. The potential of solar industrial process heat applications. **Applied Energy**, Cyprus, n. 76, p.337-361, mar. 2003.

MAAG, G.; CARRER, C.; LAO V.C.; GONSALES, N. R.; RESENDE, J.F.S.; COUTO E. B. R.; OLIVEIRA C.E.L. Previsão do desempenho anual de duas plantas piloto de torre solar híbrida de 100 kWe para cogeração

na agroindústria brasileira. In: **XI Congresso Iberoamericano ISES**, 11., 2014.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; SAFARI, A. A review on solar energy use in industries. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 15, n. 4, p.1777-1790, maio 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.018>.

SOUZA, L. E. V.; FERREIRA, L. C. Energias Renováveis e Segurança Hídrica: a energia termosolar como alternativa para a dessalinização da água do mar no Norte da África e Oriente Médio. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 1, n. 7, p.15-28, abr. 2016.

TRNSYS, A Transient System Simulation Program. User's Manual. Madison (USA): **Solar Energy Laboratory**, University of Wisconsin; 1996.