

# DESEMPENHO DE PLANTAS SOLARES HÍBRIDAS DE TORRE PARA COGERAÇÃO DE ELETRICIDADE E CALOR NA AGROINDÚSTRIA BRASILEIRA

Gilles Maag – gmaag@usp.br

Maicon Danilo Bastos – maicon.bastos@usp.br

Celso Eduardo Lins de Oliveira – celsooli@usp.br

Universidade de São Paulo, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Campus Fernando Costa, 13635-900 Pirassununga, SP.

**Resumo.** A tecnologia CSP (concentrated solar power: energia solar concentrada) é considerada muito promissora para o aproveitamento de eletricidade e calor na agroindústria em regiões com alto recurso solar, como em grandes áreas do interior Brasileiro. O desafio principal para uma implementação economicamente viável consiste na acomodação do padrão de utilização de energia do consumidor com a disponibilidade de energia solar. Dois tipos de solução existem: operação híbrida e armazenamento térmico. Neste trabalho, para o caso de uma planta híbrida solar/biodiesel com receptor central de torre, uma avaliação do desempenho técnico e econômico é feita usando um modelo numérico. Como exemplo, uma usina CSP piloto de 100 kW<sub>el</sub> a ser instalada numa planta de processamento de carne no interior do estado de São Paulo é considerada. Para os parâmetros e condições ambientais dados, a planta fornecerá um total de ca. 248 MWh por ano de energia elétrica, o 55,2% sendo de fonte solar, o sobranter gerado com 44.360 l de biodiesel por ano. 76,5% da eletricidade solar pode ser fornecida ao matadouro, o resto à rede elétrica.

**Palavras-chave:** Energia Solar Concentrada, Cogeração, Híbrido

## 1. INTRODUÇÃO

A tecnologia CSP (Concentrated Solar Power, Energia Solar Concentrada) é considerada muito promissora para o abastecimento de energia e calor de processos agro-industriais em regiões que beneficiam de alto recurso solar (> 2.000 kWh m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>) como é o caso de amplas áreas do Brasil, especialmente nas regiões Nordeste e Centro Oeste. Em áreas remotas ou em situações de preços elevados de energia elétrica, CSP pode ser vantajosa em comparação com outras novas fontes renováveis, como a energia fotovoltaica e energia eólica, assegurando disponibilidade de energia independentemente da rede, graças à possibilidade de armazenamento térmico e da hibridação com biocombustíveis, e da possibilidade de cogeração de calor de processo. Estudos anteriores sobre a implementação de aplicações de energia solar na indústria ou agro-indústria reconheceram um potencial significativo para o fornecimento de eletricidade, calor de processo e refrigeração (Fuller, 2011; Mekhilef et al., 2011; Quijera et al., 2011a, 2011b.; Tora et al., 2010).

Para promover a tecnologia CSP e demonstrar o seu funcionamento, a construção de duas usinas heliotérmicas piloto de torre central para co-geração de eletricidade e calor integradas em instalações agro-industriais estão atualmente em andamento em Pirassununga, SP, e Caiçara do Rio do Vento, RN. Ambas as usinas operam com ciclo Brayton híbrido solar/biodiesel, usando receptores solares a ar (1.173 K, 4,5 bar) de respectivamente 390 e 250 kW<sub>th</sub> alimentando uma micro-turbina de 100 kW<sub>el</sub>. Ciclos termosolares deste tipo já foram operados e testados com sucesso em passado (Amsbeck et al., 2010). O campo solar é composto de 75 (Pirassununga) e 47 (Caiçara) heliostatos, tendo cada um uma superfície reflexiva de 8 m<sup>2</sup> de área. Para uma maior concentração, as superfícies dos heliostatos é em forma de um paraboloide com distância focal de 30 m. Um desenho da usina solar e um esquema de processo são mostrados na Fig. 1.

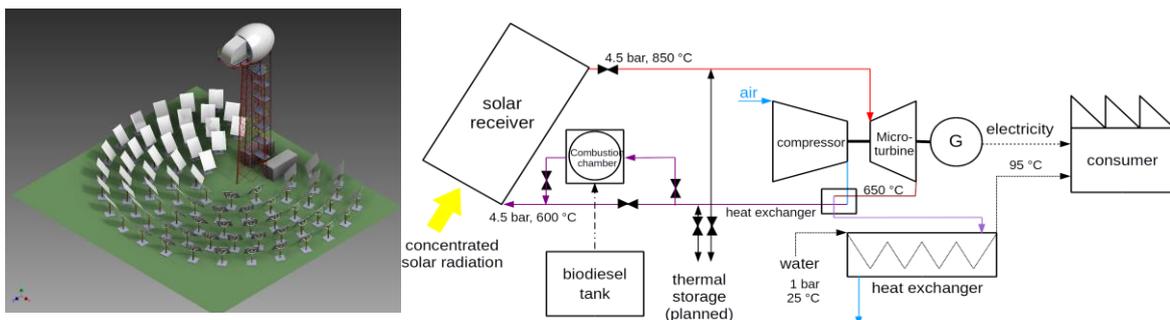


Figura 1- Desenho (esquerda) e esquema de processo (direita) da usina solar piloto de Pirassununga (SP).

Aplicações de co-geração e tri-geração para micro-turbinas (Buck e Friedmann, 2007; Ho et al, 2004; Kaikko e Backman, 2007), bem como sistemas de turbinas solares de vários tamanhos e graus de hibridação (Barigozzi et al., 2012; Le Roux et al., 2011; Schwarzbözl et al., 2006) foram propostos no passado. As plantas piloto são planejadas para abastecer de energia e calor de processo um matadouro escola (Pirassununga) e uma fábrica de laticínios (Caiçara). Neste trabalho, o desempenho da planta de Pirassununga, a maior das duas, é predito em termos de fornecimento de eletricidade e grau de cobertura do consumo elétrico do consumidor agroindustrial, usando um modelo numérico baseado em intervalos estacionários de 10 min usando valores de irradiação baseados em medições no local da instalação. Como o consumo do matadouro escola é desconhecido, estimou-se valores usando dados de produção típicos da agro indústria brasileira.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Recurso solar

Na localidade considerada (21°60' S, 47°26' O) apenas dados de radiação global horizontal (GHI – Global Horizontal Irradiation) foram disponíveis. Valores de irradiação direta (DNI – Direct Normal Irradiation), requeridos por aplicações CSP, são obtidas usando o modelo DISC (Maxwell, 1987; Ineichen et al., 1992). A partir destes dados, distribuições de probabilidade do DNI são definidas por cada hora e cada mês. Estas distribuições são usadas para gerar um valor de DNI casual mas realístico  $DNI(t)$  em cada momento de operação da planta. A potência incidente no campo de heliostatos pode ser definida como:

$$\dot{Q}_{\text{campo}}(t) = DNI(t) A_{\text{heliostato}} N_{\text{heliostatos}} \quad (1)$$

### 2.2 Usina solar

A potência entrante no receptor solar é:

$$\dot{Q}_{\text{receptor,e}}(t) = \dot{Q}_{\text{campo}}(t) \eta_{\text{campo}}(t) \quad (2)$$

$\eta_{\text{campo}}(t)$  sendo a eficiência ótica do campo. Pois esta depende da posição do sol,  $\eta_{\text{campo}}(t)$  é calculada a cada  $t$  usando uma matriz de eficiência obtida com uma simulação Monte Carlo de um modelo do campo com a ferramenta Tonatiuh (Blanco et al., 2005). A potência líquida absorvida pelo receptor solar é:

$$\dot{Q}_{\text{receptor,liq}}(t) = \dot{Q}_{\text{receptor,e}}(t) \eta_{\text{receptor}}(t) \quad (3)$$

com a diferença entre potência entrante e líquida sendo perdas de radiação através da abertura do receptor e condução através a sua parede lateral. A eficiência nominal do receptor é 90%.

### 2.3 Consumidor

Tabela 1- Cabeças abatidas, e consumo de energia elétrica estimado do matadouro escola do Campus USP de Pirassununga SP no ano 2012.

<i>Tipo de animal</i>	<i>Cabeças</i>	<i>Massa de carcaça (kg)</i>	<i>Consumo elétrico por cabeça (kWh)</i>	<i>Consumo elétrico por massa de carcaça (kWh kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Consumo elétrico total (kWh)</i>
<b>Bovinos e bubalinos</b>	325	76.030	300 kWh*	-	97.500
<b>Suínos</b>	915	45.662	125 kWh*	-	114.375
<b>Aves</b>	12.337	22.024	-	0,15**	3.304
<b>Caprinos e ovinos</b>	217	4.195	-	1,42	5.957
<b>Coelhos</b>	364	512	-	0,15***	78
<b>TOTAL</b>	14.158	148.423	-	-	221.214

\*(Pacheco, 2006)

\*\* (Bueno et al., 2008)

\*\*\* Para coelhos, o mesmo valor das aves é usado.

O requerimento energético do matadouro escola é estimado baseado no número e tipo de cabeças abatidas. A Tab. 1 reproduz as cabeças abatidas e o consumo de energia elétrica estimado do matadouro escola do Campus USP de Pirassununga SP no ano 2012.

Baseado na premissa que o 30% deste valor, ou seja 66.364 kWh, seja usado para refrigeração (24 horas por dia) e o 70%, ou seja 154.850 kWh, para operação diurna (9 horas por dia, das 8 às 17) do matadouro, pode-se definir o consumo instantâneo de eletricidade do consumidor:

$$P_{\text{consumidor}}(t) = \begin{cases} 47.1 \text{ kW}_{\text{el}}, & 8:00-17:00 \\ 7.60 \text{ kW}_{\text{el}}, & 17:00-8:00 \end{cases} \quad (4)$$

## 2.4 Bloco de potência

A potência elétrica gerada pelo bloco de potência a partir de fonte solar é:

$$P_{\text{solar}}(t) = \dot{Q}_{\text{receptor,liq}}(t) \eta_{\text{turbina}}(t). \quad (5)$$

$\eta_{\text{turbina}}$  é considerada constante a 28%. A eficiência total da planta solar é:

$$\eta_{\text{turbina}}(t) = \frac{P_{\text{solar}}(t)}{\dot{Q}_{\text{campo}}(t)}. \quad (6)$$

Quando  $P_{\text{solar}}$  é insuficiente à cobertura da demanda do matadouro, a potência que falta é gerada por biodiesel:

$$P_{\text{biodiesel}}(t) = \begin{cases} P_{\text{consumidor}}(t) - P_{\text{solar}}(t), & P_{\text{consumidor}}(t) \geq P_{\text{solar}}(t) \\ 0, & P_{\text{consumidor}}(t) < P_{\text{solar}}(t) \end{cases}. \quad (7)$$

Do outro lado, se o recurso solar excede a necessidade do consumidor, a energia elétrica pode ser fornecida à rede:

$$P_{\text{rede}}(t) = \begin{cases} P_{\text{solar}}(t) - P_{\text{consumidor}}(t), & P_{\text{solar}}(t) \geq P_{\text{consumidor}}(t) \\ 0, & P_{\text{solar}}(t) < P_{\text{consumidor}}(t) \end{cases}. \quad (8)$$

Podem-se definir a fração solar da eletricidade total gerada, a fração solar da eletricidade consumida pelo matadouro e a fração da energia solar gerada entregue à rede:

$$\varphi_{\text{solar}}(t) = \frac{P_{\text{solar}}(t)}{P_{\text{biodiesel}}(t) + P_{\text{solar}}(t)}, \quad (9)$$

$$\varphi_{\text{consumidor,solar}}(t) = \frac{P_{\text{solar}}(t) - P_{\text{rede}}(t)}{P_{\text{consumidor}}(t)}, \quad (10)$$

$$\varphi_{\text{solar,rede}}(t) = \frac{P_{\text{rede}}(t)}{P_{\text{solar}}(t)}. \quad (11)$$

## 2.5 Desempenho anual

O calor consumido  $Q$  e a energia elétrica gerada  $W$  num intervalo de tempo  $t_0 < t < t_i$ , tipicamente em um mês ou um ano, são obtidos por integração. Uma solução numérica é obtida pela discretização em intervalos  $\Delta t = 10$  min.

$$\{Q, W\} = \int_{t_0}^{t_i} \{\dot{Q}(t), P(t)\} dt \approx \sum_{i=1}^{(t_i - t_0)/\Delta t} \{\dot{Q}(t_i), P(t_i)\} \Delta t \quad (12)$$

### 3. RESULTADOS

A Fig. 2 mostra a geração de energia elétrica de fonte solar comparada ao consumo do matadouro para três dias típicos: (a) 21 de dezembro, (b) 21 de março e (c) 21 de junho. Pode-se observar que com dias de bom recurso solar, a necessidade total do matadouro pode ser suprida por energia solar, enquanto em dias mais pobres de sol, precisa-se de biodiesel para gerar a eletricidade necessária. O uso de um armazenamento térmico poderia reduzir a quantidade de biodiesel consumido.

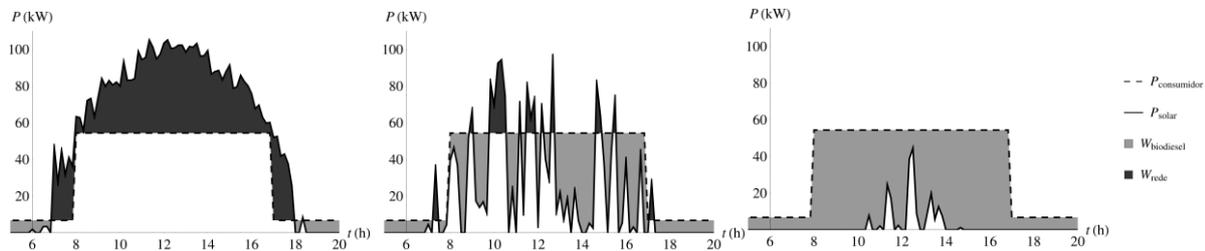


Figura 2- Geração de eletricidade de fonte solar e consumo do matadouro para: (a) 21 de dezembro, (b) 21 de março, (c) 21 de junho.

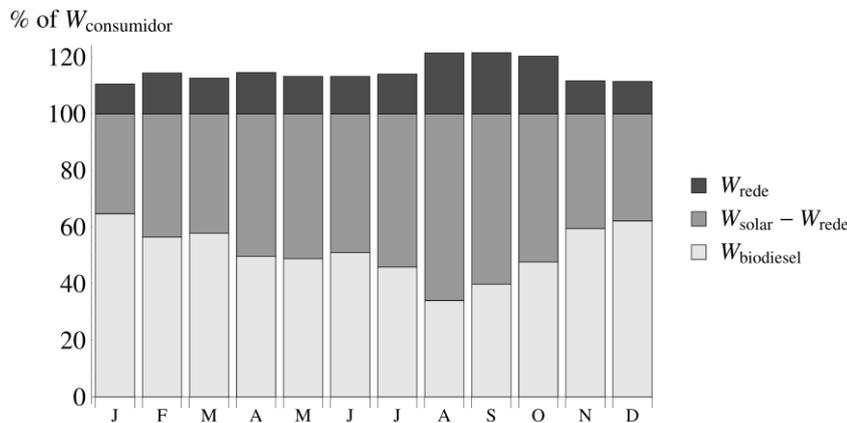


Figura 3- Fonte e uso da eletricidade gerada pela planta híbrida solar/biodiesel em % do consumo do matadouro.

A Fig. 3 mostra, por cada mês do ano, a repartição da energia usada pelo matadouro e a quantidade de energia fornecida à rede. A fração solar da energia consumida varia entre 35,2% em janeiro e 65,9% em agosto, com uma média anual do 48,5%. Estes valores relativamente elevados são favorecidos pela operação nas horas do dia do matadouro. A fração solar da energia total gerada está prevista entre 41,4% para janeiro e 71,9% para agosto. A média anual é 55,2%. Estes valores são maiores, pois em média 23,5% da energia solar é fornecida à rede e gerada fora do tempo de necessidade do matadouro. O consumo anual de biodiesel ( $LHV = 32,3 \text{ MJ}\cdot\text{l}^{-1}$ ) é de 44.360 l. Este trabalho não considera geração elétrica com biodiesel para a rede. A dependência do custo do biodiesel e do preço da eletricidade, isso pode ser vantajoso.

Observa-se também da Fig. 3 que, a causa da localização tropical da planta solar, a influência de fatores astronômicos (horas de sol por dia, elevação do sol) no desempenho da planta é inferior àquela de fenômenos atmosféricos estacionais (seca/chuva). Isto resulta num desempenho pior nos meses de verão, se comparada ao final de inverno/começo de primavera. Um sumário dos parâmetros da planta é mostrado na Tab. 2.

### 4. CONCLUSÕES

Um modelo numérico para previsão do desempenho de uma planta CSP híbrida foi formulado e usado para simular o comportamento de uma planta piloto de 100 kW<sub>el</sub> a ser construída em Pirassununga, SP, para o fornecimento de eletricidade e calor ao matadouro escola do Campus USP/FZEA. Os resultados mostram um potencial de geração de 137,1 MWh<sub>el</sub> a partir de fonte solar. Destes, o 76,5% pode ser usada pelo matadouro, suprimindo, na média anual, o 48,5% do seu consumo. O restante da demanda é suprido por biodiesel (44.360 l a-1). Os 23,5% de eletricidade solar excedentes podem ser fornecidas à rede elétrica. Outra alternativa seria a inclusão de uma unidade de armazenamento térmico que permitiria postergar a geração e reduzir a necessidade de biodiesel.

Tabela 2- Sumário dos principais parâmetros nominais e anuais da planta solar.

<i>Parâmetros nominais</i>			<i>Parâmetros anuais</i>		
$\dot{Q}_{\text{campo},N}$	kW	602,0	$Q_{\text{campo}}$	MWh	1.216,5
$\dot{Q}_{\text{receptor},e,N}$	kW	397,0	$Q_{\text{receptor},e}$	MWh	621,0
$\dot{Q}_{\text{receptor},\text{liq},N}$	kW	357,2	$Q_{\text{receptor},\text{liq}}$	MWh	489,9
$P_{\text{solar},N}$	kW <sub>el</sub>	100,0	$W_{\text{solar}}$	MWh <sub>el</sub>	137,2
$P_{\text{biodiesel},N}$	kW <sub>el</sub>	0,0	$W_{\text{biodiesel}}$	MWh <sub>el</sub>	111,3
$P_{\text{rede},N}$	kW <sub>el</sub>	45,6	$W_{\text{rede}}$	MWh <sub>el</sub>	32,3
$\dot{V}_{\text{biodiesel}}$	L h <sup>-1</sup>	0,0	$V_{\text{biodiesel}}$	l	44.360
$\eta_{\text{field},N}$		0,659	$\eta_{\text{campo}}$		0,510
$\eta_{\text{receptor},N}$		0,900	$\eta_{\text{receptor}}$		0,789
$\eta_{\text{turbina},N}$		0,280	$\eta_{\text{turbina}}$		0,280
$\eta_{\text{planta},N}$		0,166	$\eta_{\text{planta}}$		0,113
$\varphi_{\text{solar},N}$		1,000	$\varphi_{\text{solar}}$		0,552
$\varphi_{\text{consumidor},\text{solar},N}$		1,000	$\varphi_{\text{consumidor},\text{solar}}$		0,485
$\varphi_{\text{solar},\text{rede},N}$		0,456	$\varphi_{\text{solar},\text{rede}}$		0,235

### Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto SMILE (Solar-Hybrid Microturbine Systems for Cogeneration in Agro-Industrial Electricity and Heat Production), financiado pelo BNDES-FUNTEC e pela empresa Elektro - Eletricidade e Serviços, através do financiamento P&D da ANEEL. As contribuições do Andreas Pfahl e do Lars Amsbeck (DLR) na determinação do tamanho e das propriedades dos campos de heliostatos são altamente apreciadas.

### Nomenclatura

$A$	área, m <sup>2</sup>
$P$	potência elétrica, W
$Q$	energia térmica, kWh
$\dot{Q}$	potência térmica, W
$T$	temperatura, K
$t$	tempo, s
$W$	energia elétrica, kWh <sub>el</sub>

### Letras gregas

$\eta$	eficiência de conversão energética
$\varphi$	fração

### Subscritos

0	inicial
campo	campo de heliostatos
e	entrante
el	elétrico
f	final
liq	líquido
N	nominal

### Abreviações

DNI	Insolação normal direta (direct normal insolation), W m <sup>-2</sup>
GHI	Insolação global horizontal (global horizontal insolation), W m <sup>-2</sup>

LHV Poder calorífico inferior, MJ kg<sup>-1</sup>**REFERÊNCIAS**

- Amsbeck, L., et al. 2010. Test of a solar-hybrid microturbine system and evaluation of storage deployment, in: Proceedings of SolarPACES 2010 Conference, Perpignan, France, September 21-24, 2010.
- Barigozzi, G., et al., 2012. Thermal performance prediction of a solar hybrid gas turbine. *Sol. Energ.* 86, 2116-2127.
- Blanco, M., et al., 2005. The Tonatiuh Software Development Project: An Open Source Approach to the Simulation of Solar Concentrating Systems. In: Proceedings of the ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, FL, USA, November 5-11, 2005.
- Buck, R., Friedmann, S., 2007. Solar-Assisted Small Solar Tower Trigeration Systems, *J Sol. Energ. Eng.* 129, 349-354.
- Bueno, L. G. F. et al., 2008. Diagnóstico do uso de energia elétrica de um frigorífico de frangos de corte enfatizando medidas de eficiência energética, Tese de doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- Fuller, R.J., 2011. Solar industrial process heating in Australia - Past and current status. *Renewable Energ.* 36, 216-221.
- Ho, J.C., Chua, K.J., and CHOU S.K., 2004. Performance study of a microturbine system for cogeneration application. *Renewable Energ.* 29, 1121-1133.
- Ineichen, P., et al., 1992. Dynamic global-to-direct irradiance conversion models. *ASHRAE Transactions* 98, 354-369
- Kaikko, J., Backman, J., 2007. Technical and economic performance analysis for a microturbine in combined heat and power generation. *Energy* 32, 378-387.
- Le Roux, W.G., Bello Ochende, T., Meyer J.P., 2011. Operating conditions of an open and direct solar thermal Brayton cycle with optimized cavity receiver and recuperator. *Energy* 36, 6027-6036.
- Maxwell, E.L., 1987. A Quasi-Physical Model for Converting Hourly Global Horizontal to Direct Normal Insolation. SERI Technical Report SERI/TR-215-3087.
- Mekhilef, S., et al., 2011. A review on solar energy use in industries. *Renewable Sustainable Energ. Review* 15, 1777-1790.
- Pacheco, J. W., 2006. Guia técnico ambiental de frigoríficos - industrialização de carnes (bovina e suína). São Paulo - CETESB.
- Quijera, J.A., et al., (2011) Integration of a Solar Thermal System in a Dairy Process. *Renewable Energ.* 36, 1843-1853.
- Quijera, J.A., et al., (2011) Usage of solar energy in industrial process. *Chem. Eng. Transactions* 25, 875-880.
- Schwarzboezl, P., et al. (2006) Solar gas turbine systems: Design, cost, and perspectives. *Solar Energ.* 80, 1231-1240.
- Tora, E.A., El-Halwa, M.M. (2010), Integration of Solar Energy into Absorption Refrigerators and Industrial Processes. *Chem. Eng. Technol.* 9, 1495-1505.

**HYBRID SOLAR TOWER PLANT PERFORMANCE FOR CO-GENERATION OF ELECTRICITY AND HEAT IN BRAZILIAN AGRO-INDUSTRY**

**Abstract.** CSP (Concentrated Solar Power) technology is considered a promising candidate for the supply of electricity and heat to agro-industrial applications in regions with high solar resource, as it is the case for vast areas of the Brazilian Interior. The main challenge for an economically viable implementation consists in the matching of the consumer's utilization pattern with the availability of solar energy. Two types of solution exist: hybrid operation or thermal energy storage. In this work, a solar/biodiesel hybrid plant with central tower receiver is analyzed and a prevision of technical performance made using a numerical model. As an example, a 100 kW<sub>el</sub> CSP pilot plant to be installed at a meat processing factory in the interior of São Paulo State is considered. For the given parameters and environmental conditions, the plant will deliver a total of 248 MWh per year, 55.2% of which stemming from solar source, the remainder being generated by 44,360 l of biodiesel per year. 76.5% of solar electricity is delivered to the factory, the other 23.5% can be delivered to the grid.

**Key words:** Concentrated Solar Power, Co-generation, Hybrid