

## MARCO LEGAL PARA COMÉRCIO DE ENERGIA EM USINA SUCROALCOOLEIRA SOLAR HÍBRIDA

ALCIR MONTEIRO COLLAÇO<sup>1</sup>, PEDRO HENRIQUE SILVA BEZERRA<sup>2</sup>, RENAN DE SOUZA CARVALHO<sup>3</sup>, CELSO LINS DE OLIVEIRA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Professor. Universidade de Mogi das Cruzes, Campus Villa-Lobos. Av. Imperatriz Leopoldina, 550, Vila Leopoldina. 05305-060. São Paulo, SP, Brasil. E-mail:alcir.collaco@hotmail.com

<sup>2</sup>Professor Adjunto. Universidade do Estado de Mato Grosso "Carlos Alberto Reyes Maldonado", Campus de Nova Mutum. Av. das Garças, 1192, Jardim das Orquídeas. 78450-000. Nova Mutum, MT, Brasil. E-mail: pedro.bezerra@unemat.br

<sup>3</sup>Mestre em Tecnologia da Energia. Instituto de Energia e Ambiente. Universidade de São Paulo. Av. Prof. Luciano Gualberto, 1289, Butantã. 05508-010. São Paulo, SP, Brasil. E-mail: renan2.scarvalho@gmail.com

<sup>4</sup>Professor Titular no Departamento Engenharia de Biosistemas. Universidade de São Paulo. Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos. Av. Duque de Caxias Norte, 225, Campus Pirassununga. 13635-900. Pirassununga, SP, Brasil. E-mail: celsooli@usp.br

**RESUMO:** A utilização de fontes de energias renováveis em sistemas agroindustriais, têm sido uma alternativa no processo de transição energética. No mercado de energia, o principal quesito para a seleção do tipo de geração ainda é o custo. O objetivo deste trabalho, foi demonstrar o desempenho energético de 4 modelos de sistemas heliotérmicos híbridos, acoplados a uma usina sucroalcooleira, atuando no atual mercado de energia por meio do comércio da energia gerada excedente ao consumo. O software *System Advisor Model* (SAM), foi utilizado nas simulações para a obtenção do desempenho energético e do custo nivelado da energia gerada (LCoE). Os casos foram dimensionados a atender a carga de consumo de uma usina sucroalcooleira, operando em resposta ao recurso solar. A hibridização de sistemas (*Concentrated Solar Power*) CSP de geração com biomassa disponível durante parte do ano contribui para um bom fator de capacidade. Sistemas de geração, que operam com duas fontes distintas, possibilitam mais segurança de entrega e minimizam riscos, o que contribuiu na formulação do contrato de energia. Os entraves do mercado de energia são possíveis de serem solúveis por meio da aplicação de políticas públicas energéticas, de forma a alavancar a competitividade da tecnologia CSP em relação às demais.

**Palavras-chave:** energia solar concentrada, geração híbrida, usina sucroalcooleira, mercado de energia, contrato de energia.

## LEGAL FRAMEWORK FOR ENERGY TRADE IN HYBRID SOLAR SUGAR ALCOHOL POWER PLANT

**ABSTRACT:** The use of renewable energy sources in agro-industrial systems has been an alternative in the energy transition process. In the energy market, the main issue for selecting the type of generation still the cost. This paper aimed to demonstrate the energy performance of 4 models of hybrid heliothermic systems, coupled to a sugar and alcohol power plant, operating in the current energy market through the trade of energy generated in excess of consumption. To obtain the energy performance and the leveled cost of energy (LCoE), simulations were carried on the software *System Advisor Model* (SAM). The cases were sized to meet the consumption load of a power plant, operating in response to the solar resource. The hybridization of CSP (*Concentrated Solar Power*) systems with biomass available during part of the year can increase the capacity factor. Generation systems, which operate from two sources, provide more secure delivery of energy and minimize risks, which contributed to the formulation of the energy contract. The obstacles in the energy market are possible to be solved through the application of public energy policies, in order to leverage the CSP technologies' competitiveness regarding other green technologies.

**Keywords:** concentrated solar power, hybrid generation, sugar/alcohol power plant, energy market, energy contract.

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, ocorre de forma geral uma profunda mudança nos sistemas de produção, em relação ao tipo e a quantidade de energia utilizada. Os valores econômicos envolvidos em processos produtivos que requerem intenso consumo energético têm sido maximizados, por meio da influência de medidas econômicas, sociais e políticas. Essa estratégia é parte de uma profunda mudança que objetiva diminuir a dependência por combustíveis fósseis e introduzir soluções energéticas ou a utilização de energias renováveis. Essa mudança é tida com uma transição energética, que ocorre de forma definitiva nos modelos de produção existentes, a fim de implantar uma nova concepção de economia, com baixo consumo de carbono.

Além da mudança dos modelos produtivos, a utilização de fontes de energias renováveis e a implementação de eficiência energética em sistemas produtivos agroindustriais têm sido amplamente indicados como possíveis soluções. Porém, no mercado de energia o principal quesito para a seleção do tipo de geração ainda é o custo. A implementação de novas tecnologias de geração limpa está intimamente relacionada a políticas energéticas e esclarecimento científico. O competitivo mercado de energia obriga o governo a seguir em medidas políticas públicas que viabilizem o investimento, a fim de se obter baixo custo de geração. No caso do Brasil, a matriz elétrica possui uma predominância hídrica, porém, com as consecutivas crises hídricas nos últimos anos, o volume dos reservatórios tem baixado alarmantemente, demandando assim, de forma emergencial a utilização de outras fontes de energia, que casualmente possuem um custo elevado. Fato que tem proporcionado momentos oportunos para Usinas Sucroalcooleiras, conectadas ao SIN (Sistema Interligado Nacional). Sistemas de processamento de cana-de-açúcar demandam fornecimento confiável de energia e calor. Nesse sentido, aplicações com geração

heliotérmica apresentam vantagens em relação a outras fontes e podem ser utilizadas no processo como fonte de calor auxiliar. Para tanto, *software* de previsão de desempenho energético e econômico de sistemas de geração renováveis são ferramentas disponíveis que auxiliam no processo de tomada de decisões e no estabelecimento de novas tecnologias envolvidas na cadeia produtiva das renováveis. O SAM é um *software* usado para previsão de performance de sistemas de geração de energia elétrica por fonte renovável (GUZMAN; HENAO; VASQUEZ, 2014), conectados na rede elétrica de distribuição, acoplados a alguma carga de consumo (GILMAN; DOBOS, 2012). O SAM combina modelos de produção de energia de séries temporais anuais, associa parâmetros dimensionais com a disponibilidade solar, com modelos financeiros para estimar o custo de energia nivelado (LCoE) e outras métricas para projetos de energia renovável (DOBOS; NEISES; WAGNER, 2014). O modelo criado no SAM, requer dados de entrada que descreve as características de desempenho dos componentes físicos do sistema e os custos e premissas financeiras assumidas no projeto (GILMAN; DOBOS, 2012).

Neste âmbito, a energia heliotérmica se mostra como uma possibilidade de complementação desta matriz elétrica, principalmente devido à sua modularização de despacho, grande diferencial quando relacionada com as demais tecnologias intermitentes como fotovoltaica e eólica. O objetivo deste trabalho, é demonstrar o desempenho energético de 4 modelos de sistemas heliotérmicos híbridos, acoplados a uma usina sucroalcooleira de dimensão típica, atuando no atual mercado de energia por meio do comércio da energia gerada excedente ao consumo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa se estende sobre estudos prévios que analisaram economicamente sistemas CSP com torre central operando de

forma híbrida, seja com biomassa, gás natural ou algum armazenamento térmico (BEZERRA; SERAPHIM; OLIVEIRA, 2018; ELLINGWOOD; MOHAMMADI; POWELL, 2020). As atividades foram desenvolvidas em parceria com a Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos – FZEA / Universidade de São Paulo – USP, no LEESP (Laboratório de Eficiência Energética e Simulação de Processos / USP). O ano típico meteorológico, foi caracterizado com dados solarimétricos (BEZERRA; SERAPHIM; OLIVEIRA, 2018). O local escolhido para obtenção dos valores do recurso solar foi Pirassununga, latitude 21°59'46" S e a uma longitude 47°25'33" O, a uma altitude de 627 metros, com os dados meteorológicos obtidos na Estação Climatológica e processados no LEESP. Os dados de radiação solar foram calculados a partir do modelo DNI (feixe de radiação direta) sobre uma superfície horizontal com acompanhamento Leste-Oeste, durante um ano, usando um pireliômetro com sistema de rastreador solar. O *software System Advisor Model (SAM)*, foi utilizado para a obtenção do desempenho energético e do custo na energia gerada (LCoE) custos do sistema híbrido de geração (UNITED STATES, 2018). Para demonstrar o enquadramento legal jurídico de usinas Sucroalcooleira Solar Híbrida no atual cenário de comércio de energia no Brasil, foram selecionados casos de sistemas CSP já em funcionamento em outros países. Tais casos foram caracterizados com os aspectos dimensionais reais, porém com uma carga de consumo típica de uma usina sucroalcooleira, operando em resposta ao recurso solar disponível no estado de São Paulo. As simulações no SAM foram realizadas com 4 casos com diferentes capacidades nominais, todas dentro do âmbito da tecnologia de torre

central, que tem sido intensamente investigada (ELLINGWOOD; MOHAMMADI; POWELL, 2020). A configuração dos casos propostos, foram com base em parâmetros dimensionais energéticos disponíveis na literatura:

- Caso 1 - Gemasolar: O primeiro caso abordado foi de uma usina com 20MW, semelhante à capacidade da usina Gemasolar, localizada em Sevilha, na Espanha, com tecnologia de torre central com dois tanques de armazenamento em sais fundidos capazes de fornecer 15 horas de armazenamento (UNITED STATES, 2017).
- Caso 2 - Usina Sucroalcooleira Híbrida: Foi dimensionado um caso de usina Heliotérmica híbrida, com capacidade instalada de 30MW, com a fim de atender a demanda energética de um caso típico de sistema sucroalcooleiro, no estado de São Paulo.
- Caso 3 - Hami: O segundo caso analisado, a capacidade adotada foi de 50MW, semelhante à usina Hami, localizada na região autônoma de Xinjiang, na China (UNITED STATES, 2018), a qual está em desenvolvimento, mas também terá capacidade de 50MW e armazenamento térmico de 8 horas através da aplicação de sais fundidos com dois tanques diretos.
- Caso 4 - Golden Tower: Para o último caso, a capacidade adotada foi 100MW, A Golden Tower está localizada em Jinta, na província de Gansu, com armazenamento térmico de 8 horas através de sais fundidos em dois tanques diretos (UNITED STATES, 2016).

Contudo, a Tabela 1, apresenta os valores dimensionais utilizados como parâmetros nas simulações em cada caso.

**Tabela 1.** Valores dimensionais dos casos analisados e simulados.

	<b>Gemasolar</b>	<b>Usina Híbrida</b>	<b>Hami</b>	<b>Golden Tower</b>
Capacidade da turbina	20 MW	30 MW	50 MW	100 MW
Múltiplo solar	2.4	0.5	1.5	2.2
Armazenamento	15 hrs	0	8 hrs	8 hrs
Suprimento híbrido	Não	65%	Não	Não
Área total	114.1 ha	91.9 ha	166.7 ha	608.2 ha
Geração Anual (MWh)	51.952	79.256	132.663	494.110
Fator de capacidade	30%	31%	30.60%	56.50%

Estes casos foram selecionados na pesquisa, a fim de demonstrar quais os possíveis cenários de mercado energético que podem ser explorados por sistemas de geração com capacidades equivalentes dos 4 casos propostos na metodologia, porém operando com o recurso solar disponível no Brasil.

## 2.1 Caracterização do Consumo

O consumo energético de uma usina sucroalcooleira ocorre tipicamente em duas formas: (i) eletromecânica (acionamentos, iluminação, etc.) e (ii) térmica (aquecimento, evaporação, cozimento). A Tabela 2, apresenta o balanço de energia de um sistema típico sucroalcooleiro analisado.

**Tabela 2.** Balanço de energia da usina Sulcroalcooleira

<b>Caracterização operacional</b>	
Safra	(8 meses)
Horas de operação	5760
Cana processada (t)	1700000
Cana processada / hora	300 ton / h
Demanda	358 kWh / t cana
Demanda vapor	180 t vapor / hr
Consumo interno	9.3 MWh
Biomassa Total (t)	505.500
Energia Gerada (MWh)	182.226
Energia Consumida (MWh)	544.00
Energia Exportada (MWh)	127.826

**Fonte:** Adaptado de Betin (2017)

Toda essa demanda é suprida pela queima de bagaço, cavaco e palha residual do próprio processo, como fonte alternativa. A queima da biomassa é usada para geração de vapor a uma pressão superior à necessária no processo. A temperatura de operação é em torno de 500 °C e a pressão 65 bares, que alimentam o bloco de potência com capacidade nominal definido para cada caso. Inicialmente, o vapor gerado é expandido em turbinas a vapor sendo convertido em energia mecânica/elétrica. Em seguida, o calor rejeitado no escape das turbinas é redirecionado aos processos na forma de energia térmica.

Tais valores, foram usados na determinação de despacho de energia a alimentar a demanda da usina e o bloco de potência do sistema. A entrega de energia foi construída principalmente em função da safra de cana de açúcar na região e do contrato de venda de energia elaborado.

## 2.2 Métricas e Parâmetros Financeiros

A combinação de métricas financeiras e custos do sistema foram entradas na simulação para obtenção do Custo Nivelado de Energia (*Levelized Cost of Electricity – LCoE*), que representa os custos totais do projeto durante

seu tempo de vida, comumente expresso em centavos por quilowatt-hora de eletricidade gerada pelo sistema ao longo do tempo. Fez-se necessária, portanto, a correção dos valores nominais pela inflação do período, aplicou-se

uma taxa interna de retorno de 10%, o teto de tempo de retorno sobre investimento (ROI) de 10 anos. As demais métricas financeiras, invariáveis durante as simulações, estão dispostas na Tabela 3.

**Tabela 3.** Parâmetros financeiros constantes aplicados no SAM

Parâmetros financeiros			
Modo de solução	Meta de TIR: 10%	Período TIR: 10 anos	Aumento de PPA: 6,79%
Parâmetros de análise	Período de análise: 30 anos	Inflação: 6,79%	Taxa real de desconto: 12%
Taxas de seguro e prazo de débito	Taxa de seguro: 0,5% a.a.	Taxa de cobertura da dívida (DSCR): 1,1	Prazo de amortização: 10 anos

Além dos custos dos componentes do sistema, foram utilizados nas simulações dos casos, parâmetros de custo anual, como impostos e taxas aplicadas no setor elétrico no âmbito de geração de eletricidade.

Esses encargos, foram aplicados no *software* SAM como parâmetros de custo fixo anual, na aba de “Custos de Sistema” - “Custos fixos por capacidade”. Os encargos foram:

- Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica (TFSEE), no qual de acordo com o Nota Técnica 88/2017 de 24 de maio de 2017, atribui-se uma taxa de R\$ 2,55/kW (BRASIL, 2017);
- Tarifas de Transmissão e Distribuição (TUSD e TUST) com encargo de R\$ 6,36/kW, com desconto de 50% em tal valor, considerando empreendimentos com potência injetada menor ou igual a 30 MWel em operação após 31 de dezembro de 2017 (BRASIL, 2012);

Os tributos federais utilizados como entradas foram (ENDEAVOR BRASIL, 2015):

- Imposto de Renda sobre Pessoa Jurídica (IRPJ), o qual incide sobre o lucro líquido de uma empresa com uma alíquota variável de acordo com o segmento, no qual será adotada uma alíquota de 8% para atividades em geral (BRASIL, 2016);

- Contribuição Social sobre Lucro Líquido (CSLL), a qual assim como o IRPJ, incide sobre o lucro líquido com uma alíquota de 9% (BRASIL, 2016).

Outros tributos como o COFINS e PIS/PASEP, que são contribuições que incidem sobre a renda bruta, com uma alíquota combinada, em geral de 3,65%, assim como o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), o qual incide com uma alíquota que se situa normalmente entre 10% a 12% (ENDEAVOR BRASIL, 2015).

Já o principal tributo estadual utilizado foi o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), porém pode variar de acordo com o produto, serviço e Estado (ENDEAVOR BRASIL, 2015). Na maior parte dos casos, o ICMS corresponde a um percentual de 18%, a ver de alimentos básicos, nos quais o percentual é 7%, e produtos supérfluos, nos quais o percentual é 25% (SÃO PAULO, 2013). Portanto, a alíquota adotada no estudo foi de 18%. As depreciações Federais e Estaduais utilizam o método 5-y MACRS, com a adoção de um valor de contingência de 10%, semelhante ao utilizado por Soria (2011).

Contudo, os encargos que compõem esse custo de geração, denominado nessa pesquisa como o Cenário Base, são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Encargos financeiros utilizados no Cenário base no SAM

Cenário base		
Encargos Federais: (21,65%) PIS/PASEP e COFINS: 3,65% IRPJ: 9% CSLL: 9%	Encargos Estaduais: ICMS: 18%	Financiamento: BNDES Finem: 11,3%

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos valores dimensionais de entrada, dos critérios econômicos e financeiros; pode-se obter valores da quantidade de energia gerada e do custo da energia para cada caso proposto, operando na forma de Usina Sucroalcooleira Solar Híbrida, em resposta ao recurso solar em Pirassununga – SP.

#### 3.1 Caracterização energética da usina sucroalcooleira

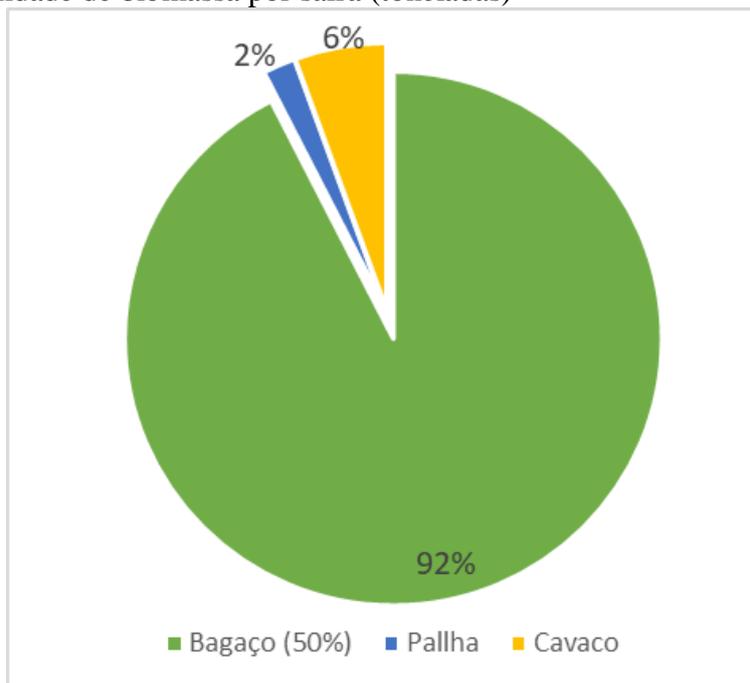
O perfil de consumo típico de uma usina sucroalcooleira usado nas análises de cada sistema CSP se estende sobre pesquisas anteriores (BERTIN, 2017; PETERSEIM et al., 2014; SORIA et al., 2015). A Tabela 5, apresenta valores de consumo e disponibilidade sazonal de biomassa da usina sucroalcooleira aplicada na pesquisa.

**Tabela 5.** Disponibilidade de biomassa sazonal

Biomassa	
Bagaço (50% umidade) (t)	467.500
Palha (t)	10.000
Cavaco (t)	28.000
Biomassa total (t)	505.500
Relação (t/MWh)	2,77
E Biomassa (MWh)	182.226
E Consumida (MWh)	54.400

Para o caso típico em análise, a disponibilidade de biomassa por safra foi 505,5 toneladas. A safra da cana dura em média de 7 a 8 meses (CASTRO; FRANCO; MUTTON, 2014). Cerca de 92% de toda biomassa é bagaço

residual, sendo que cavaco e palha representam 6% e 2% respectivamente do total. A Figura 1, demonstra a quantidade de biomassa, discriminada em bagaço, cavaco e palha por safra.

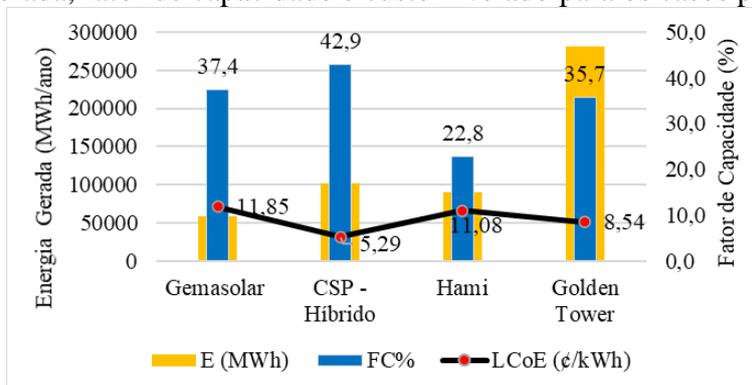
**Figura 1.** Disponibilidade de biomassa por safra (toneladas)

A tecnologia de geração híbrida é considerada um dos focos de pesquisa atualmente no campo da energia solar (JU et al., 2017). A utilização de biomassa como fonte auxiliar em sistemas CSP permite a geração mesmo em momentos em que não há sol. Sistemas CSP-Híbridos por fonte auxiliar biomassa aumentam a capacidade de despacho de energia de sistemas de geração (PETERSEIM et al., 2014). A possibilidade de utilizar biomassa como fonte auxiliar de um sistema CSP permite que geração ocorra não somente durante a safra, bem como durante os doze meses. Em dias de sol disponível, a

geração ocorre por fonte solar e durante a noite por queima da biomassa.

### 3.2 Cenário Base

O ponto de desenho dimensional dos quatro casos de sistemas heliotérmicos com torre central foi utilizado como critério para obtenção do montante de energia gerada e do fator de capacidade. A Figura 2, apresenta os resultados de energia gerada, fator de capacidade e custo nivelado dos 4 casos propostos.

**Figura 2.** Energia gerada, fator de capacidade e custo nivelado para os casos propostos

O montante de energia gerada nas configurações foi compatível com a capacidade de geração de cada sistema associado ao

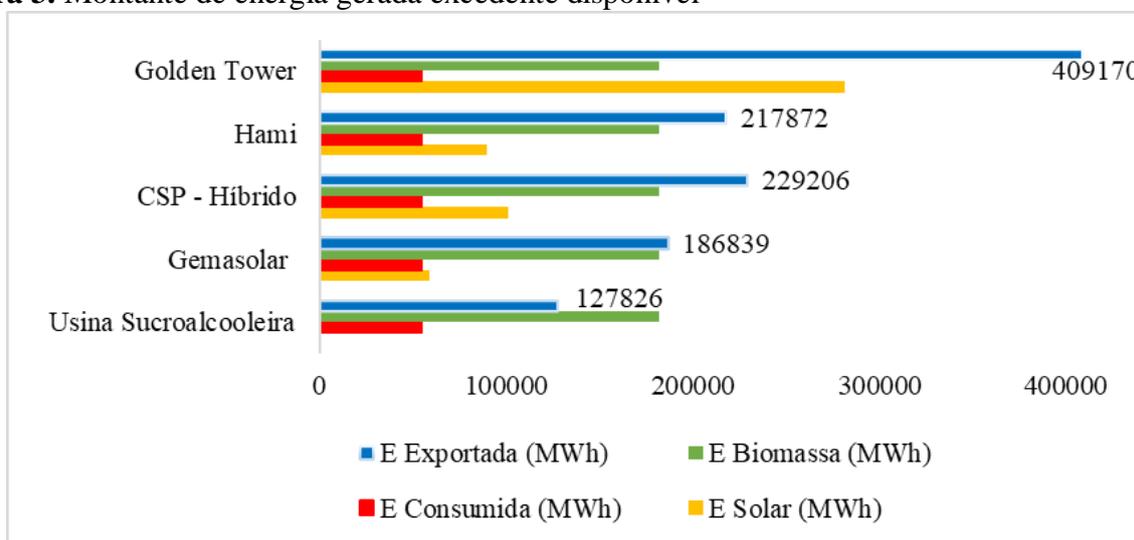
recurso solar disponível, bem como também o Fator de Capacidade. O maior valor de energia gerada foi no caso Golden Tower, com 281.344

MWh/ano. Embora os fatores de capacidade típicos para renováveis intermitentes estejam geralmente entre 20% e 40%, e usinas com armazenamento térmico de energia alcancem a 50% (GREEN et al., 2015), o maior valor de FC obtido foi no sistema CSP-Híbrido na ordem de 42%, número típico para usinas CSP (PARRADO et al., 2016). Isso se deve ao despacho de energia ocorrer mesmo em períodos que não há sol, em virtude da disponibilidade de biomassa na safra. A estratégia de despacho em sistema de geração CSP híbrido possibilita um alto fator de capacidade e maximiza o cumprimento da entrega de energia (GREEN et al., 2015). O LCoE apresentou um comportamento distinto no sistema de geração CSP-Híbrido, devido ao baixo custo da biomassa, amplamente disponível durante 8 meses do ano. O ponto de desenho dimensional adotado para o sistema CSP-Híbrido se estende sobre pesquisas anteriores (BETIN, 2017; SORIA et al., 2015; PETERSEIM et al., 2014) que sugerem múltiplo solar menor que 1 e fração de hibridização do sistema por biomassa entre 55-

65%. Fato que refletiu no valor do LCoE 5.29 ¢/kWh do sistema. A possibilidade de operar sistemas de geração CSP – Híbrido, com 65% da energia requerida do bloco de potência oriunda de biomassa, ocasiona redução de custo da energia gerada. Sistema de geração CSP híbrido pode produzir eletricidade com melhor qualidade e menor custo nivelado, comparado com o sistema CSP sem hibridização (JU et al., 2017).

A segunda etapa da pesquisa foi realizada a fim de obter o montante de energia gerada disponível, após suprir a demanda energética da usina Sulcroalcooleira, com capacidade de moagem típica de 505 toneladas safra. A quantidade de energia oriunda da queima de biomassa residual, somada a quantidade de energia gerada pelo sistema CSP, forneceram o montante de energia anual disponível a ser comercializada. A Figura 3, apresenta o montante de energia gerada por fonte solar e por biomassa, como também o excedente disponível, após suprir a demanda energética da usina sucroalcooleira.

**Figura 3.** Montante de energia gerada excedente disponível



A quantidade de energia exportada no caso Golden Tower foi 3,2 vezes maior que o valor da usina sucroalcooleira sem sistema CSP. Já no caso com menor capacidade instalada (Gemasolar) o valor de energia exportada atingiu a ordem de 186.839 MWh disponíveis a serem comercializadas.

### 3.3 Comércio de Energia

As características dimensionais e de desempenho de cada sistema foram construídas intimamente correlacionadas com os possíveis contratos de comercialização de energia. Os resultados de cada caso analisado, foram enquadrados num modelo contratual de comércio de energia, vigente com o marco legal

regulatório. A energia gerada excedente, o LCoE, a disponibilidade e o fator de capacidade foram parâmetros determinantes na construção dos contratos de energia. Os contratos estabelecem padrões e especificações, de direitos e obrigações de remuneração e compromisso de entrega, entre o empreendedor e a distribuidora. Fatores e características como: potência instalada, taxa de indisponibilidade forçada, dos casos foram considerados na construção dos contratos de energia.

Como não houve ainda leilão de energia direcionado exclusivamente para empreendimentos heliotérmicos, a análise comparativa de mercado de energia foi construída com os valores de leilões de energia fotovoltaica, dos últimos 4 anos. Nesse âmbito, o valor de leilão utilizado nos contratos de energia apresentados no tópico seguinte foi

relativo ao ocorrido em agosto de 2015, com o valor de R\$ 301,64/MWh. Dentre os leilões de Fontes Alternativas, a energia solar fotovoltaica nunca havia sido contemplada, desde o primeiro leilão realizado em 2007. Contudo, os tópicos seguintes apresentam a possibilidade contratual de comércio de energia para cada caso proposto.

### 3.3.1 Gemasolar

O caso Gemasolar apresentou um montante de energia gerada excedente disponível a ser comercializada na ordem de 60.000 MWh/ano. A possibilidade de geração para um sistema com capacidade instalada 20 MW, com 15 horas de armazenamento térmico, associado ao fator de capacidade de 38%, permitiu a formação do contrato descrito na Tabela 6.

**Tabela 6.** Caracterização contratual do Caso Gemasolar 20 MW

<b>Caso: Gemasolar 20MW</b>	
Geração	Distribuída
Fonte	Termosolar
Classe	Autoprodutor remoto
Montante de energia	60.000 MWh
Sistema de compensação	Crédito (60 meses)

Caso a Normativa 482, que permite que consumidores gerem sua própria energia próximo a unidade de consumo, não se limitasse a sistemas de geração com capacidade máxima instalada de 5 MW (no caso solar), seria possivelmente um autoprodutor remoto, que se beneficiaria por um modelo de compensação do consumo registrado para um determinado mês, com a utilização de créditos oriundos da entrega de energia na rede. Créditos tais, que podem ser abatidos no prazo máximo de 60 meses. Usinas híbridas com armazenamento demonstram um potencial promissor para produção confiável e limpa de eletricidade (RASHID et al., 2020).

### 3.3.2 CSP – Híbrido

O contrato de venda de energia oriundo do caso CSP-Híbrido, se enquadrado na modalidade disponibilidade de energia, em que

o agente gerador é remunerado de acordo com a energia assegurada, ou seja, está autorizado a vender, no preço do leilão, a quantidade máxima de energia durante um predeterminado período. O ambiente de comercialização foi o regulado. Para esse caso específico, como a fonte do sistema é híbrida e não somente solar, o leilão contemplado foi Leilão de Ajuste, no qual complementa a carga de energia demandada pelo mercado consumidor das concessionárias de distribuição, com um limite de 1% da carga total contratada. O Horizonte de contratação foram 2 anos, com início de fornecimento no ano seguinte. O despacho sazonalizado indica que a distribuição do volume anual de energia foi distribuída durante os meses do ano, principalmente nos meses em que se há a disponibilidade de biomassa. A Tabela 7, apresenta as especificações do contrato de energia para o caso CSP-Híbrido.

**Tabela 7.** Contrato de energia para o caso CSP-Híbrido

<b>Caso: CSP-Híbrido</b>	
Ambiente de Contratação	Regulado
Fonte	Termosolar/Biomassa
Classe	Agente gerador
Montante de energia habilitada	100.000 MWh
Despache	Sazonalizado (hora)
Mercado de Curto Prazo (PLD)	N/A
Contrato	Leilão de Ajuste
Empreendimento	Existente
Suprimento contratual	2 anos
Horizonte de contratação	A-1
Início de fornecimento	12 meses
Modalidade	Disponibilidade

O valor do leilão oferecido pelo agente, deve ser suficiente para garantir a renda anual, custos fixos depreciação, taxa de retorno e o fluxo de caixa. Nesse caso, o LCoE foi 5,30 ¢/kWh, menor valor em comparação aos outros casos. Isso que equivale a um custo de geração de 169,07 R\$/MWh, valor atrativo diante do valor do leilão de energia usado como referência.

A combinação de sistema híbrido de geração com a tecnologia CSP ocasiona custo nivelado de energia menor, como reflexo do alto fator de capacidade alcançado (GREEN et al., 2015).

O Fluxo de caixa, portanto, conjecturando o valor do Leilão de Ajuste, no mesmo nível de preço utilizado nos casos anteriores (301,64 R\$/MWh), associado ao montante anual de energia gerada (281.343,616 MWh) seria de R\$ 37.297.723 por ano. O fornecimento de energia com início no ano

subsequente (A-1), com vigência de 2 anos. Conjecturar a contemplação de um Leilão de Ajuste por um sistema de geração CSP-Híbrido, só apresenta uma possibilidade de leilão que poderá ser contemplada no futuro. Uma vez que a tecnologia se encontre num patamar razoável de maturidade e com tudo, forneça níveis competitivos de LCoE, outros leilões e contratos de fornecimento de energia poderão ser explorados.

### 3.3.3 Hami

A partir dos resultados da simulação, foi construído o contrato de venda de energia mediante o prazo de 35 anos, no ambiente regulado, com início de fornecimento no prazo de 5 anos (A-5). Nesse caso, o produtor independente, teria um montante médio de 250.000 MWh a ser despachado por módulos durante o ano (Tabela 8).

**Tabela 8.** Contrato de energia para o caso Hami

<b>Caso: Hami</b>	
Ambiente de Contratação	Regulado
Fonte	Termosolar
Classe	Produtor Independente
Montante de energia habilitada	250.000 MWh
Despache	Modulação (anual)
Leilão Fonte Alternativa	LFA
Contrato	Energia Regulada
Empreendimento	Novo
Suprimento contratual	35 anos
Horizonte de contratação	A-5
Início de fornecimento	2026
Modalidade	Quantidade

Porém, o parâmetro de remuneração que seria estabelecido em função do custo da energia gerada não pode ser obtido, uma vez que o LCoE desse sistema ficou na ordem de 12,77 ¢/kWh, ou seja, 35% acima do valor de leilão FA usado como referência.

Fato reforça que, a criação de leilão de energia direcionado exclusivamente para sistemas de geração heliotérmica, pode tornar possível a viabilidade econômica de sistemas com capacidade instalada de 100 MW. Os valores de geração, fator de capacidade e garantia física são compatíveis com sistemas de geração que já participam do mercado de energia com êxito.

### 3.3.4 Golden Tower

Para esse caso específico Golden Tower, foi demonstrado a possibilidade de

atender simultaneamente o mercado livre de energia, assim como o mercado regulado de energia. Com isso, todo o procedimento ocorreu como se o sistema de geração tivesse subdivido em duas usinas secundárias, ou seja, parte do montante disponível foi negociado no mercado regulado, por meio de leilão de fonte alternativa. A outra fração da energia disponível foi comercializada no mercado livre, por meio de um contrato bilateral, negociado com um consumidor livre qualquer.

No ambiente regulado, como produtor independente Golden Tower poderia contemplar um contrato com o montante de energia habilitada de 250.000 MWh, com despache modular (anual) durante 15 anos de fornecimento a serem fornecidos a partir do primeiro ano subsequente após a concessão (A-1). A modalidade alcançada foi por quantidade de energia (Tabela 9).

**Tabela 9.** Contrato de energia para o caso Golden Tower (Mercado Regulado)

<b>Caso: Golden Tower 100 MW</b>	
Ambiente de Contratação	Regulado
Fonte	Termosolar
Classe	Produtor Independente
Montante de energia habilitada	250.000 MWh
Despache	Modulação (anual)
Leilão Fonte Alternativa	LFA
Contrato	Energia Regulada
Empreendimento	Existente
Suprimento contratual	15 anos
Horizonte de contratação	A-1
Início de fornecimento	2022
Modalidade	Quantidade

O montante a ser fornecido durante os 35 anos, ao LCoE de 6,62 ¢/kWh e com o valor do Leilão FA utilizado anteriormente, proporcionaria um fluxo de caixa na ordem de R\$ 25.398.857,62 ano.

A segunda opção conjecturada para o Caso Golden Tower, no ambiente livre, para um

possível produtor independente, com o prazo de suprimento definido inicialmente por 2 anos, sendo o início 2 anos (A-2) após o ano base estabelecido no contrato e com a possibilidade de ser estendido (Tabela 10).

**Tabela 10.** Contrato de energia para o caso Golden Tower (Mercado Livre)

<b>Caso: Golden Tower 100 MW</b>	
Ambiente de Contratação	Livre
Fonte	Termosolar
Classe	Produtor Independente
Garantia física	N/A
Montante de energia habilitada	30.000 MWh
Despache	Sazonalizado (hora)
Fonte Alternativa	LFA
Contrato	Bilateral
Empreendimento	Novo
Suprimento contratual	2 anos
Horizonte de contratação	A-2
Início de fornecimento	2020
Modalidade	Disponibilidade

Contratos de energia estabelecidos na modalidade disponibilidade, são firmados entre as partes um valor fixo a ser pago, independentemente da quantidade a ser entregue. Tal valor é obtido a partir dos custos fixos do sistema de geração, geralmente termoelétricas. No entanto, custos variáveis como o relativo ao uso do combustível utilizado são repassados aos consumidores, por meio de reajuste tarifário.

Conjecturando por analogia, os valores recordes de leilões pagos, como por exemplo o ocorrido em 2013 durante o ápice da crise hídrica, que atingiram níveis de R\$ 800/MWh, diante do LCoE obtido sob influência dos incentivos, que foi de 6,62 ¢/kWh, o fluxo de caixa anual seria de R\$ 165.661.310,7 ano. Resultado esse que torna a viabilidade econômica de sistemas de geração atrativa do

ponto de vista de investimento financeiros, que poderão ser investigados em pesquisas futuras.

#### 4 CONCLUSÕES

Os casos dimensionados a atender a demanda energética de um caso típico de usina sucroalcooleira, demonstraram valores de rendimento energético regular que referiram positivamente na redução do custo nivelado da energia gerada (LCoE).

A hibridização de sistemas CSP de geração com biomassa disponível durante boa parte do ano, contribui para um bom fator de capacidade. Os FC obtidos foram próximos aos valores publicados em outros países, onde a tecnologia CSP se encontra mais madura.

No caso CSP-Híbrido, a ampla disponibilidade de biomassa, associado ao ponto de dimensionamento do sistema de geração, operando em resposta ao recurso solar disponível, influenciou positivamente nos valores de custo nivelado da energia gerada (LCoE).

De todos os casos propostos, o CSP-Híbrido e o Golden Tower apresentaram valores de geração satisfatório que ampliaram a possibilidade de explorar o mercado de energia por meio da legislação vigente.

O caso Gemasolar apresentou resultados mais tímidos em relação aos demais

devido principalmente a capacidade de geração reduzida (20MW). Isso mostra que o ponto dimensional para sistemas CSP Híbrido com capacidade de geração instalada superior a 100 MW teriam melhores possibilidades de atuação no atual mercado de energia.

O atual modelo legal de comércio de energia, permite que uma gama de possibilidades contratuais seja realizada, com diferentes características que envolveram tanto quantidade de energia gerada, quanto o período de abrangência do fornecimento e a disponibilidade da energia gerada.

A combinação de dois sistemas de geração, possibilita a exploração de vários cenários de comércio de energia. Sistemas de geração, que operam com duas fontes distintas, possibilitam melhores níveis de segurança de entrega e minimizam riscos, o que contribui nas estratégias contidas nas formulações de contratos de energia.

Atualmente no Brasil, existe o real quadro propício para a realização de leilões direcionados exclusivamente para sistemas de geração heliotérmica. Os entraves e falhas do mercado de energia são possíveis de serem solúveis por meio da aplicação de políticas públicas energéticas, de forma a alavancar a competitividade da tecnologia CSP em relação às demais.

#### 5 REFERÊNCIAS

BETIN, A. J. O. **Análise de geração distribuída de eletricidade com tecnologia heliotérmica em usina sucroalcooleira como vetor de economia de bagaço de cana-de-açúcar**. 2017. 75 f.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Inovação na Indústria Animal) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2017.

BEZERRA, P. H. S.; SERAPHIM, O. J.; OLIVEIRA, C. E. L. Previsão de performance energética por meio de simulação transiente de um sistema CSP com torre central integrado a atividades agroindustriais. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 33, n. 3, p. 264-269, dez. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17224/energagric.2018v33n3p264-269>. Acesso em: 18 jan. 2019.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota Técnica nº 88/2017-**

**RM/SGT/SRD/ANEEL, de 24 de maio de 2017**. Proposta de estabelecimento de parâmetros regulatórios para os processos tarifários das Distribuidoras Designadas, definidas nos termos da Resolução Normativa nº 748/2016, e de limites para os indicadores de continuidade coletivos DEC e FEC. Brasília, DF: ANEEL, 2017. Disponível em: [https://www.aneel.gov.br/audiencias-publicas-antigas?p\\_p\\_id=participacaopublica\\_WAR\\_participacaopublicaportlet&p\\_p\\_lifecycle=2&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_cacheability=cacheLevelPage&p\\_p\\_col\\_id=column-](https://www.aneel.gov.br/audiencias-publicas-antigas?p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-)

2&p\_p\_col\_pos=1&p\_p\_col\_count=2&\_participacaopublica\_WAR\_participacaopublicaportlet\_ide Documento=7792&\_participacaopublica\_WAR\_participacaopublicaportlet\_tipoFaseReuniao=fase &\_participacaopublica\_WAR\_participacaopublicaportlet\_jspPage=%2Fhtml%2Fpp%2Fvisualizar.jsp. Acesso em: 26 fev. 2018.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: Seção 1, Brasília, DF, v. 149, n. 76, p. 53, 19 abr. 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 14 set. 2017.

BRASIL. Ministério da Fazenda. **Perguntas e Respostas**: Pessoa Jurídica. Brasília, DF: Secretaria da Receita Federal do Brasil, 2016. Disponível em: <https://receita.economia.gov.br/orientacao/tributaria/declaracoes-e-demonstrativos/ecf-escrituracao-contabil-fiscal/perguntas-e-respostas-pessoa-juridica-2016-arquivos/perguntas-e-respostas-irpj-2016.pdf/view>. Acesso em: 12 set. 2017.

CASTRO, S. G. Q.; FRANCO, H. C. J; MUTTON, M. Â. Harvest managements and cultural practices in sugarcane. **Revista Brasileira de Ciências e Solo**, Viçosa, v. 6, n. 38, p. 299-306, 2014.

DOBOS, A.; NEISES, T.; WAGNER, M. Advances in CSP Simulation Technology in the System Advisor Model. **Energy Procedia**, Las Vegas, v. 49, p. 2482-2489, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.263>. Acesso em: 23 fev. 2017.

ENDEAVOR BRASIL. **Os principais tributos que todo empreendedor precisa conhecer**. São Paulo: Endeavor Brasil, 2015. Disponível em: <https://endeavor.org.br/leis-e-impostos/os-principais-tributos-que-todo-empendedor-precisa-conhecer/>. Acesso em: 14 set. 2017.

ELLINGWOOD, K.; MOHAMMADI, K.; POWELL, K. A novel means to flexibly operate a hybrid concentrated solar power plant and improve operation during non-ideal direct normal irradiation conditions. **Energy Conversion and Management**, Salt Lake City, v. 203, p. 112275, jan. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112275>. Acesso em: 22 out. 2020.

GILMAN, P.; DOBOS, A. **System Advisor Model, SAM 2011.12.2**: General Description. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2012. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/53437.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2018.

GREEN, A.; DIEP, C.; DUNN, R.; DENT, J. High Capacity Factor CSP-PV Hybrid Systems. **Energy Procedia**, Beijing, v. 69, p. 2049-2059, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.218>. Acesso em: 16 nov. 2018.

GUZMAN, L.; HENAO, A.; VASQUEZ, R. Simulation and Optimization of a Parabolic Trough Solar Power Plant in the City of Barranquilla by Using System Advisor Model (SAM). **Energy Procedia**, Cancun, v. 57, p. 497-506, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.203>. Acesso em: 23 fev. 2016.

JU, X.; XU, C.; HU, Y.; HAN, X.; WEI, G.; DU, X. A review on the development of photovoltaic/concentrated solar power (PV-CSP) hybrid systems. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Beijing, v. 161, p. 305-327, Mar. 2017. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.12.004>. Acesso em: 14 set. 2017.

PARRADO, C.; GIRARD, A.; SIMON, F.; FUENTEALBA, E. 2050 LCOE (Levelized Cost of Energy) projection for a hybrid PV (photovoltaic)-CSP (concentrated solar power) plant in the Atacama Desert, Chile. **Energy**, Antofagasta, v. 94, p. 422-430, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.015>. Acesso em: 02 nov. 2018.

PETERSEIM, J. H.; TADROS, A.; WHITE, S.; HELLWIG, U.; LANDLER, J.; GALANG, K. Solar Tower-biomass Hybrid Plants – Maximizing Plant Performance. **Energy Procedia**, Las Vegas, v. 49, p. 1197-1206, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.129>. Acesso em: 24 jul. 2020.

RASHID, K.; MOHAMMADI, K.; POWELL, K. Dynamic simulation and techno-economic analysis of a concentrated solar power (CSP) plant hybridized with both thermal energy storage and natural gas. **Journal of Cleaner Production**, Salt Lake City, v. 248, p. 119193. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119193>. Acesso em: 29 mar. 2020.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria da Fazenda e Planejamento do Estado de São Paulo. **Sobre isenção do ICMS para veículos**. São Paulo: Secretaria da Fazenda e Planejamento do Estado de São Paulo, 2013. Disponível em: <https://portal.fazenda.sp.gov.br/servicos/isencao-icms-veiculos/Paginas/Sobre.aspx>. Acesso em: 14 set. 2017.

SORIA, R. **Cenários de geração de eletricidade a partir de geradores heliotérmicos no Brasil: a influência do armazenamento de calor e da hibridização**. 2011. 187 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: [http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Rafael\\_Andr%C3%A9s.pdf](http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Rafael_Andr%C3%A9s.pdf). Acesso em: 24 jul. 2020.

SORIA, R.; PORTUGAL-PEREIRA, J.; SZKLO, A.; MILANI, R.; SCHAEFFER, R. Hybrid concentrated solar power (CSP) – biomass plants in a semiarid region: a strategy for CSP deployment in Brazil. **Energy Policy**, London, v. 86, p. 57-72, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2015.06.028>. Acesso em: 24 jul. 2020.

UNITED STATES. Department of Energy. National Renewable Energy Laboratory. **Gemasolar Thermosolar Plant**. Golden: NREL, 2017. Disponível em: <https://solarpaces.nrel.gov/gemasolar-thermosolar-plant>. Acesso em: 14 set. 2017.

UNITED STATES. Department of Energy. National Renewable Energy Laboratory. **Golden Tower 100MW Molten Salt project**. Golden: NREL, 2016. Disponível em: <https://solarpaces.nrel.gov/golden-tower-100mw-molten-salt-project>. Acesso em: 14 set. 2017.

UNITED STATES. Department of Energy. National Renewable Energy Laboratory. **Hami 50 MW CSP Project**. Golden: NREL, 2018. Disponível em: <https://solarpaces.nrel.gov/hami-50-mw-csp-project>. Acesso em: 12 set. 2017.

UNITED STATES. Department of Energy. National Renewable Energy Laboratory. **System Advisor Model (SAM) General Description (Version 2017.9.5)**. Golden: NREL, 2018. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/70414.pdf>. Acesso em: 12 set. 2017.