UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

ANDRÉ JEANDRO DE OLIVEIRA BERTIN

**Análise de geração distribuída de eletricidade com tecnologia heliotérmica em
usina sucroalcooleira como vetor de economia de bagaço de cana-de-açúcar**

PIRASSUNUNGA

2017

ANDRÉ JEANDRO DE OLIVEIRA BERTIN

Análise de geração distribuída de eletricidade com tecnologia heliotérmica em usina sucroalcooleira como vetor de economia de bagaço de cana-de-açúcar

Versão corrigida

Dissertação apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências do programa de pós-graduação em Gestão e Inovação na Indústria Animal.

Área de concentração: Gestão

Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Lins de Oliveira

PIRASSUNUNGA

2017

Ficha catalográfica elaborada pelo
Serviço de Biblioteca e Informação, FZEA/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

dB544 de Oliveira Bertin, Andre Jeandro
a Análise de geração distribuída de eletricidade com
tecnologia heliotérmica em usina sucroalcooleira
como vetor de economia de bagaço de cana-de-açúcar /
Andre Jeandro de Oliveira Bertin ; orientador Celso
Eduardo Lins de Oliveira. -- Pirassununga, 2017.
73 f.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
em Mestrado Profissional Gestão e Inovação na
Indústria Animal) -- Faculdade de Zootecnia e
Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo.

1. Energia heliotérmica. 2. Energia solar. 3.
Usina sucroalcooleira. 4. Bagaço de cana-de-açúcar.
5. Híbridização. I. Lins de Oliveira, Celso Eduardo,
orient. II. Título.

DEDICATÓRIA

À minha amada esposa Aline Bertin, pelo incondicional apoio de sempre. Te amo!

AGRADECIMENTOS

À Deus, por Jesus Cristo, sobre todas as coisas, à minha esposa pelo contraponto e apoio, à minha família pelos ensinamentos éticos, ao meu orientador Prof. Celso Oliveira pela consideração, oportunidades e ensinamentos, ao Prof. Celso Carrer pelo esforço e trabalho no Mestrado Profissional, ao doutorando Pedro Henrique pela grande força nas simulações, e aos amigos, parceiros e sócios porque a força está no coletivo.

Deus vos abençoe!

EPÍGRAFE

“E, na verdade, toda a educação, no momento, não parece motivo de alegria, mas de tristeza. Depois, no entanto, produz naqueles que assim foram exercitados, um fruto de paz e de justiça”
(Hebreus 12; 11)

RESUMO

BERTIN, 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. 69 f. Dissertação (Mestrado em Gestão na Indústria Animal) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2017.

A geração de energia elétrica a partir de bagaço de cana-de-açúcar representa 6,97% da capacidade total instalada no Brasil, equivalendo a terceira maior fonte de geração de energia brasileira, atrás da geração hídrica (61,17%) e gás natural (8,50%), segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2016b). O bagaço de cana-de-açúcar tem se tornado um grande ativo das usinas sucroalcooleiras por sua capacidade de transformação energética através da queima em caldeiras, produzindo vapor para o processo produtivo e alimentando processos térmicos para geração de energia elétrica. Assim, cada vez mais buscam-se alternativas de eficiência produtiva, de maneira a economizar bagaço visando prolongar o período de geração na entressafra, quando não há produção de cana-de-açúcar. O objetivo da presente pesquisa é avaliar a redução de consumo de bagaço a partir da inserção de sistemas heliotérmicos (CSP em inglês *Concentration Solar Power*) de torre em usinas sucroalcooleiras. Para tanto simulou-se no software SAM® um sistema de geração de energia solar heliotérmica de torre, tomando como base dados de geração de energia em um ano típico de uma usina sucroalcooleira do interior do estado de São Paulo, paralelamente com os dados de radiação solar da mesma região onde a usina está instalada. Através da simulação da integração das tecnologias e geração de energia advinda do sistema solar projetado, analisou-se o potencial de redução do consumo de bagaço de cana durante o período estudado.

Palavras-Chave: Energia heliotérmica. Energia solar. Usina sucroalcooleira. Bagaço de cana-de-açúcar. Geração distribuída. Hibridização.

ABSTRACT

BERTIN, A. J. O. **Analysis of distributed electricity generation with solar thermal technology in sugarcane plant as vector biomass sugarcane economy**. 2016. 69 f. Master's Thesis in Management in Animal Industry – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2017.

The generation of electric from sugarcane bagasse represents 6.97% of the total capacity installed in Brazil, accounting for the third largest source of Brazilian energy generation, behind hydraulic generation (61.17%) and gas (8.50%), according to the National Electric Energy Agency (ANEEL, 2016). Sugarcane bagasse has become a major asset of sugarcane mills due to its capacity for energy transformation through burning in boilers, producing steam for the production process and fueling thermal processes for the generation of electric energy. Thus, more and more alternatives are sought for productive efficiency, in order to save bagasse to prolong the generation period in the off season, when there is no sugar cane production. The goal of the present research is to evaluate and reduce bagasse consumption from the insertion of tower solarization (CSP) in sugarcane plants. In order to do so, a solar heliothermic solar tower generation system was simulated in the SAM software, based on data from the generation of energy in a typical year of a sugar-alcohol plant in the interior of the state of São Paulo, in parallel with the radiation data in the same region where the plant is installed. Through the simulation of the integration of the technologies and generation of energy coming from the projected solar system, was calculated the potential of reducing the consumption of sugarcane bagasse during the studied period was analyzed.

Keywords: Heliothermic energy. Solar energy. Plant sugarcane. Sugar cane bagasse. Hybridization.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - FONTES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	16
FIGURA 2 – TRANSFORMAÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA	17
FIGURA 3 - COMPONENTES DA IGH:	18
FIGURA 4 - IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL (IGH) NO BRASIL.....	19
FIGURA 5 - GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA	20
FIGURA 6 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DE PLANTA CSP COM ARMAZENAMENTO TÉRMICO	21
FIGURA 7 - ÓRBITA DA TERRA EM TORNO DO SOL, COM SEU EIXO N-S INCLINADO	23
FIGURA 8 - DISTRIBUIÇÃO DAS PRINCIPAIS FONTES NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA EM 2017	24
FIGURA 9 - CAPACIDADE TOTAL INSTALADA PELOS PRINCIPAIS PAÍSES (MWE).....	27
FIGURA 10 - PROGRESSÃO DA CAPACIDADE MUNDIAL TOTAL INSTALADA DE CSP (MWE).....	28
FIGURA 11 - CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE TECNOLOGIAS CSP	31
FIGURA 12 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DE GERAÇÃO DE ENERGIA HELIOTÉRMICA POR TORRE	33
FIGURA 13 - PARTE POSTERIOR DE UM HELIOSTATO COM MOTORES DE ATUAÇÃO	34
FIGURA 14 - RECEPTOR E HELIOSTATOS	35
FIGURA 15 - HISTÓRICO DE PRODUÇÃO E MOAGEM DE CANA-DE-AÇÚCAR	40
FIGURA 16 - FLUXOGRAMA DO DESENHO DA USINA HÍBRIDA CSP - BAGAÇO DE CANHA-DE-AÇÚCAR.....	46
FIGURA 17 – RADIAÇÃO DIRETA - ANO METEOROLÓGICO TÍPICO 2006-2008.....	49
FIGURA 18 - EFICIÊNCIA ÓTICA DO CAMPO SOLAR (A) E PERFIL DO FLUXO SOLAR NO RECEPTOR (B).	50
FIGURA 19 - ENERGIA TÉRMICA ABSORVIDA (A) E ENERGIA TÉRMICA INCIDENTE NO RECEPTOR (B).	51
FIGURA 20 - COORDENADAS DOS HELIOSTATOS NO CAMPO SOLAR (A) E HELIOSTATO (ATS) 148 M2 (B).....	54
FIGURA 21 - PERÍODOS DE PROGRAMAÇÃO DA FRAÇÃO HÍBRIDA NO BLOCO DE POTÊNCIA	57
FIGURA 22 - GERAÇÃO DE ENERGIA E O COMPORTAMENTO DO CUSTO NIVELADO.	60
FIGURA 23 - COMPORTAMENTO DO CUSTO NIVELADO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DO CAMPO SOLAR.....	61
FIGURA 24 - GERAÇÃO DE ENERGIA E O COMPORTAMENTO DO CUSTO NIVELADO EM FUNÇÃO DO FATOR DE HIBRIDIZAÇÃO.	61
FIGURA 25 - VALORES DE GERAÇÃO DE ENERGIA E ECONOMIA DE BIOMASSA DOS MODELOS PROPOSTOS.....	63
FIGURA 26 - VALORES DE SOBRA DE BIOMASSA (T) E ENERGIA GERADA COM A SOBRA (MWE)	63

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	25
TABELA 2 - AUMENTO DA CAPACIDADE DE CSP INSTALADA POR PAÍS NO FINAL DE 2015.....	29
TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS DAS TECNOLOGIAS CSP.....	32
TABELA 4 - BALANÇO DE ENERGIA DA USINA NO ANO DE 2015.....	46
TABELA 5 - CARACTERIZAÇÃO OPERACIONAL DA USINA	47
TABELA 6 - VOLUME DISPONÍVEL DE BIOMASSA (SAFRA 2015)	48
TABELA 7 - VALORES DO DESEMPENHO ÓTICO DO CS E DO DESEMPENHO TÉRMICO DO RECEPTOR.....	51
TABELA 8 - DESCRIÇÃO NOMINAL DA USINA CSP-HÍBRIDA	53
TABELA 9 – PARÂMETROS FINANCEIROS DO SISTEMA HÍBRIDO.....	55
TABELA 10 - CUSTOS TOTAIS ASSOCIADOS AO SISTEMA HÍBRIDO	56
TABELA 11 - CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE HIBRIDIZAÇÃO	58
TABELA 12 - DESEMPENHO ENERGÉTICO E CUSTO NIVELADO DA ENERGIA	59
TABELA 13 - DESEMPENHO ENERGÉTICO E CUSTO NIVELADO DA ENERGIA	60
TABELA 14 - DESEMPENHO ENERGÉTICO E O CUSTO NIVELADO DA ENERGIA COM VARIAÇÃO DE MÚLTIPLO SOLAR	61
TABELA 15 - RESULTADOS FINAIS OBTIDOS COM O MODELO IDEAL: MÚLTIPLO SOLAR 0.5 E FRAÇÃO HÍBRIDA 65%.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMT – Ano Típico Meteorológico
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
ATS – Advanced Thermal Systems
BIG – Banco de Informações de Geração
BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CCEE – Ciclo Combinado de Calor e Eletricidade
CEPEL - Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CHESF - Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
CPFL - Companhia Piratininga de Força e Luz, Companhia Paulista de Força e Luz e Rio Grande Energia
CS – Campo Solar
CTGAS-ER - Centro de Tecnologias do Gás e Energia Renovável
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
ESC – Energia Solar Concentrada
FC – Fator de Capacidade
FH – Fração Híbrida
FRD – Feixe de Radiação Direta
FUNTEC – Fundo Tecnológico
FZEA – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos
GD – Geração Distribuída
GREEN - Grupo de Pesquisa em Reciclagem, Eficiência Energética e Simulação Numérica
IEA – International Energy Agency
IGH – Irradiação Global Horizontal
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
kWe – Kilo Watt elétrico
LABSOLAR – Laboratório de Energia Solar
LCoE – Custo Nivelado de Energia
MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MMA – Ministério do Meio Ambiente
MME – Ministério de Minas e Energia
MS – Múltiplo Solar
MW – Mega Watt
MWe – Mega Watt elétrico
O&M – Operação e Manutenção
ORC – Organic Rankine Cycle (Ciclo Orgânico Rankine)
PDE - Plano Decenal de Expansão de Energia
P&D – Pesquisa e Desenvolvimento
SAM – System Advisor Model
SIN – Sistema Interligado Nacional
TWh – Tera Watt hora
TIR – Taxa Interna de Retorno
UFPE – Universidade Federal do Pernambuco
UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

ÚNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar

UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá

USP – Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1	Energia renovável.....	16
2.2	Radiação e geração de energia elétrica a partir da energia solar	17
2.3	Movimento relativo do sol	22
2.4	Energia solar no Brasil.....	23
2.5	Energia heliotérmica	26
2.5.1	<i>Tecnologias de geração de energia heliotérmica</i>	30
2.5.2	<i>Torre Solar</i>	32
2.6	Sistemas heliotérmicos no Brasil	36
2.7	Energia elétrica a partir de bagaço de cana-de-açúcar	38
2.8	Simulações realizadas a partir de ferramentas computacionais	41
3	OBJETIVO	42
4	METODOLOGIA	43
4.1	Configuração e sequência de desenvolvimento do sistema	44
4.2	Caracterização do consumo da usina sucroalcooleira.....	46
4.3	Irradiação solar	48
4.4	Caracterização Ótica do Campo Solar	49
4.6	Parâmetros financeiros do sistema.....	55
4.7	Configuração do sistema com fonte híbrida	56
5	RESULTADOS	59
6	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICE	71

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a geração, transmissão e distribuição de energia no Brasil tem passado por grandes transformações visando atender ao aumento de consumo, alavancado pelo avanço tecnológico e principalmente industrial do país. O consumo de eletricidade no Brasil cresceu a uma taxa de 5,8% ao ano de 1973 a 2011. Nos próximos dez anos, o planejamento energético do Ministério de Minas e Energia (MME), considerando os estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2021 da Empresa de Pesquisa Energética (PDE - EPE), (2013, p. 34), indica uma taxa média de crescimento em torno de 5% ao ano para o consumo de eletricidade e demanda total de energia.

A matriz energética brasileira é constituída por 61,17% de energia gerada a partir de hidrelétricas (ANEEL, 2016a) e, para Ventura Filho (2013, p. 2-5), do total de energia elétrica oferecida em 2011, (569 TWh), em torno de 90% foram distribuídos nas linhas de transmissão e distribuição do Sistema Interligado Nacional (SIN), 8% representou consumo próprio de autoprodutores, sem uso da rede elétrica pública e os demais 2% ficaram a cargo dos Sistemas Isolados do Norte do Brasil.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2016a) a energia gerada a partir de bagaço de cana-de-açúcar representa 6,97% da capacidade total instalada no Brasil, equivalendo a terceira maior fonte de geração de energia, atrás da geração hídrica (61,17%) e por gás natural (8,50%). A expectativa de participação na matriz energética nacional para geração a partir do bagaço de cana para 2020 é de 15%, segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2008).

O setor sucroalcooleiro representa um dos setores mais importantes da economia brasileira, fazendo do país o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, que teve na safra 2015/2016 665,6 milhões de toneladas de cana-de-açúcar produzida (PORTAL BRASIL, 2016).

Por ser considerada uma fonte limpa e renovável, a geração de energia elétrica através da queima do bagaço de cana-de-açúcar contribui para a preservação ambiental, capaz de complementar a oferta energética do país de forma sustentável. Além do fator ambiental, essa geração de energia apresenta vantagem sobre a hidráulica pela manutenção da geração em períodos de menor pluviosidade (ARAÚJO, 2014).

Apesar de todo o cenário positivo, o setor sucroalcooleiro tem passado por grandes dificuldades financeiras devido à perda de competitividade, diminuição da exportação de açúcar e até problemas climáticos. Segundo Freitas e Batista (2016, p.1) a dívida total do setor saltou de R\$ 38 bilhões para R\$ 96 bilhões nos últimos seis anos (2010 a 2016). Por esse motivo, desde 2011, de um total de aproximadamente 370 usinas de etanol e açúcar instaladas no país, cerca de 50 unidades encerraram suas atividades e outras 70 entraram com pedido de recuperação judicial (BATISTA, 2016).

Diante desse cenário, o setor tem cada vez mais buscado alternativas para gerar maior ganho de eficiência no processo produtivo, inclusive na cogeração de energia elétrica a partir da queima do bagaço de cana visando fechamento de contratos de comercialização de energia. Assim, o contexto de produção eficiente de energia e inovação tecnológica ganha espaço para que se possam desenvolver e inserir novas tecnologias a serem aplicadas no setor de maneira que se produza mais energia de forma mais eficiente, aproveitando recursos disponíveis e integráveis entre si.

A geração de energia a partir de usinas térmicas em usinas sucroalcooleiras fica limitada no período em que há disponibilidade de bagaço de cana-de-açúcar, que é o insumo utilizado por ser subproduto da produção de açúcar e álcool. No período em que não há essa disponibilidade – entressafra - as usinas, em sua grande maioria, não geram energia elétrica, pois não há a viabilidade econômica da utilização de outras fontes energéticas, como cavaco de eucalipto, por exemplo, dado ao custo dessas fontes alternativas, comparadas com o bagaço disponível. Dessa maneira, os contratos de venda de energia ficam limitados de acordo com a capacidade de geração no período de safra – diretamente dependente do bagaço disponível.

Na possibilidade de apresentar uma potencial solução dessa problemática, com a inserção de outra fonte de geração de energia - como a proposta nessa pesquisa - esse período de geração tende a aumentar, uma vez que o potencial de redução do consumo de bagaço no período de safra, a partir da inserção de outra fonte geradora de energia, permitiria estocar o insumo excedente para posterior utilização quando já não há mais disponibilidade desse insumo no período de entressafra. Assim, se permitiriam o fechamento de contratos de venda de energia maiores e mais lucrativos.

Outra possibilidade de geração de valor para a usina sucroalcooleira é lançar mão da venda do bagaço excedente. Ressalta-se, porém, que o objetivo dessa pesquisa é delimitar o quanto de redução de consumo de bagaço a partir da integração de tecnologia de geração de energia solar em usina sucroalcooleira permitiria, não aprofundando detalhes econômicos gerados a partir dessa redução, tampouco fluxo de caixa.

Blay Jr. (2014, p.1) corrobora que o setor do agronegócio encontra uma excepcional possibilidade de produzir nova fonte de receitas com geração de energia elétrica em grande escala a partir de resíduos, efluentes orgânicos, energia solar e eólica, dentre outras.

No que tange a geração de energia a partir da fonte solar, o potencial energético nacional conta com vasto espaço para pesquisas na área de geração de energia a partir dessa fonte. Ainda que em estado de consolidação, a geração de energia solar representativa no Brasil se dá praticamente através da tecnologia fotovoltaica, com 23 MW de potência instalada (ANEEL, 2016b). A tecnologia fotovoltaica converte energia solar diretamente em energia elétrica.

Com relação a geração de energia solar heliotérmica, o processo se dá a partir da conversão da energia térmica coletada em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica. A grande vantagem dessa tecnologia, entre outras, é a possibilidade de integração com demais sistemas térmicos de cogeração de energia.

Porém antes de investir em um sistema integrado de geração de energia, necessitam-se saber quais os benefícios que essa potencial integração pode propiciar. Chegar a números precisos (entre esses números, o retorno do capital) é difícil, pois cada instalação exige um estudo individualizado, principalmente quando envolve tecnologia ainda não implantada no Brasil, como é o caso da cogeração de energia através das centrais de Energia Solar Concentrada (ESC).

Os números dependem de vários fatores, principalmente do potencial de geração de energia quando integrado um sistema solar à uma usina e, no caso dessa pesquisa, do consequente potencial de redução do consumo de bagaço de cana que essa integração proporciona.

Quando se lança mão da utilização de sistemas de simulação para análise prévia de resultados de integração de tecnologias, principalmente as inovadoras, verificam-se os potenciais resultados da aplicação e mitigação de custos.

Nesse sentido, diversos autores realizaram simulações preliminares da integração de tecnologia CSP em diversos processos, como o caso de Milani (2016), que trabalhou na análise de hibridização de gaseificação de biomassa e energia heliotérmica no sistema SAM (*System Advisor Model*). Esse sistema simula as características técnicas e econômicas de usinas elétricas de fontes renováveis.

Também utilizando o SAM, Rodrigues e Siqueira (2015) simularam a geração de energia a partir da integração de uma planta CSP de torre em uma usina sucroalcooleira. Do mesmo modo, Burin et al. (2015) simularam a integração de uma planta CSP de cilindro parabólico em uma usina sucroalcooleira hipotética em Campo Grande – MS. Em todos os casos citados, os autores obtiveram como resultados análises prévias do potencial de geração de energia elétrica a partir das integrações de tecnologias.

Ainda que tardia, porém inevitável, diante da crise energética eminente no Brasil - principalmente a que afeta o setor sucroalcooleiro - uma solução apresentada nessa pesquisa é a análise da redução do consumo de bagaço de cana-de-açúcar a partir da inserção de CSP em usinas de açúcar e álcool.

Para tanto, foi realizada a simulação de um estudo de caso em uma usina do interior de São Paulo tomando como base dados de balanço energético da usina em um ano típico e modelagem intrínseca de um sistema heliotérmico de torre a partir de dados de irradiação solar coletados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Energia renovável

Dos sistemas de energias renováveis conhecidos, e explorados atualmente, para essa pesquisa interessam aqueles que possibilitem cogeração de eletricidade e calor, pois são estes os modelos aplicáveis à cogeração de energia em usinas sucroalcooleiras.

A Figura 1 ilustra as fontes de energia renováveis conhecidas e estudadas atualmente.

Figura 1 - Fontes de energias renováveis

Fonte: PORTAL ENERGIA SOLAR. **Alta temperatura energia solar térmica**. 2015. Disponível em: <<http://pt.solar-energia.net/solar-termica/temperatura-alta>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

A Figura 2 representa as fontes de energia renováveis e não renováveis e seus caminhos até se transformarem em energia aproveitável.

Figura 2 – Transformação das Fontes de Energia

Fonte: PORTAL ENERGIA SOLAR. **Alta temperatura energia solar térmica**. 2015. Disponível em: <http://pt.solar-energia.net/solar-termica/temperatura-alta>. Acesso em: 18 jan. 2017.

Assim, a energia renovável estudada nessa pesquisa se delimitará na energia solar concentrada.

2.2 Radiação e geração de energia elétrica a partir da energia solar

Somente uma pequena parte da radiação solar atinge a superfície terrestre. A parcela que chega ao solo é composta por duas componentes, uma chamada direta (*Direct Normal Incidence*, DNI) e outra chamada de difusa. A soma desses componentes representa a Irradiação Global Horizontal (IGH), que é o valor da

radiação recebida por uma superfície plana horizontal e que é de grande importância para a geração fotovoltaica. Na

Figura 3 são apresentados os componentes da IGH e na Figura 4 está representada os dados de IGH distribuídos no Brasil.

Figura 3 - Componentes da IGH: Radiação Difusa, radiação refletida e radiação direta

Fonte: Própria autoria.

Figura 4 - Irradiação Global Horizontal (IGH) no Brasil

Fonte: SOLARGIS. **Average annual sum, period 1999-2013.** Disponível em: <http://solargis.info/imaps/#tl=Google:hybrid&bm=satellite&loc=-14.235004,-51.92528&c=-14.235004,-51.92528&z=15>. Acesso em: 12 nov. 2015.

A irradiação difusa é uma parte da radiação dispersa e atenuada pela reflexão nos componentes atmosféricos, como: nuvens, poeira, vapor d'água e outros. Se a superfície do ambiente estiver inclinada com relação à horizontal, haverá uma terceira componente refletida pelo solo e outros objetos. Esse componente é chamado de radiação refletida e pode ser inclusa na radiação difusa.

A irradiação normal direta é a parte proveniente diretamente do sol (sem reflexões) e é muito variável ao longo do dia, devido às condições atmosféricas, principalmente em áreas de grande nebulosidade. A radiação direta é a parte mais importante para a geração solar térmica.

A energia do sol é passível de captação de duas maneiras: por intermédio da conversão de sua radiação diretamente em eletricidade ou utilizando sua radiação para aquecer um fluido térmico (líquido ou gás).

O mais usual é a geração de energia solar fotovoltaica através de painéis no telhado de uma casa ou edifício. O painel fotovoltaico converte os fótons diretamente em eletricidade, usando o efeito fotoelétrico descoberto por Albert Einstein há mais de um século. Os fótons são pequenos pacotes de energia luminosa que chocam átomos de um elemento condutor, como o cobre, e eleva-os a um estado de energia mais elevado. Isso faz com que os átomos liberem elétrons, enquanto o núcleo é carregado positivamente. Com esta energia adicional do fóton, os elétrons em órbitas, ou "casca", mais próximos do núcleo do átomo são empurrados para longe dele, derrubando os ultraperiféricos soltos, uma vez que estes os deslocam. Estes elétrons de alta energia atacam outros átomos e derrubam os elétrons de suas camadas externas também. Isto torna-se uma cascata de elétrons através da substância condutora – a corrente elétrica (Figura 5).

Figura 5 - Geração de energia fotovoltaica

Fonte: INSTITUTO NACIONAL DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL – INEAM. Como a radiação solar é transformada em energia elétrica? Disponível em < <http://ineam.com.br/como-a-radiacao-solar-e-transformada-em-energia-eletrica/> > Acesso em 17 ago. 2016.

Já as centrais CSP utilizam a radiação do sol para gerar energia a partir do calor do sol absorvido para gerar vapor, que, em seguida, aciona uma turbina para gerar eletricidade. Basicamente, a concentração solar aquece um fluido, que é então utilizado para acionar uma turbina, gerando eletricidade. Os fótons do sol excitam os

átomos do fluido movendo-o mais rapidamente. Se o fluido é um líquido, água por exemplo, as moléculas se desencaixam umas das outras tomando a forma gasosa, neste caso, vapor de água. Se o fluido é um gás, as moléculas já separadas fecham-se em torno ainda mais rápido com a energia adicional, literalmente saltando fora das paredes de qualquer recipiente onde estejam confinados. Em ambos os casos, o resultado é um aumento da pressão com o aumento da temperatura. Canalizando esta pressão em tubos isolados estreitos (elevando a temperatura ainda mais por compressão) cria-se força mecânica para transformação de energia.

Conforme definição de Milani (2016), uma vez recebido o calor, o fluido de trabalho pode atuar de duas maneiras:

- A) Após a concentração no receptor, o fluido se direciona para o reservatório quente do ciclo termodinâmico. Desse ponto, o processo dá-se idêntico à uma planta termelétrica convencional;
- B) A outra forma dá-se com a inserção de armazenamento térmico no ciclo. Parte do fluido quente é armazenado após ser absorvido no receptor e parte vai para o processo. Esse fluido armazenado em baterias térmicas é utilizado em períodos onde não há incidência solar (noturno ou encoberto) (Figura 6).

Figura 6 - Esquema simplificado de planta CSP com armazenamento térmico

Fonte: MILANI, R. F. A. T. **Hibridização de energia heliotérmica com gaseificação de bagaço para geração de energia elétrica**. 2016. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/rmilani.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2016.

2.3 Movimento relativo do sol

A trajetória da Terra ao redor do Sol tem a forma elíptica em um plano inclinado de aproximadamente $23,5^{\circ}$ com relação ao plano formado pela linha do equador. Por força dessa inclinação do eixo da Terra a duração dos dias durante o verão é maior do que a duração dos dias durante o inverno, e o sol atinge posições mais elevadas nos meses de verão com relação aos meses de inverno.

Declinação Solar (δ) é a posição relativa do Sol com relação ao plano do Equador (Norte positivo) ao meio dia solar. A Figura 7 representa a variação do ângulo δ ao longo dos dias e das estações do ano, variando dentro dos seguintes limites: $-23,45^{\circ} \leq \delta \leq 23,45^{\circ}$ (PINHO; GALDINO, 2004).

A trajetória aparente do Sol é determinada pela composição da inclinação e da latitude local em um determinado dia e em um determinado local do planeta. A execução desses cálculos é muito importante para o posicionamento dos componentes de captação de energia solar, em busca da máxima performance e rendimento do sistema solar (Figura 7).

Figura 7 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado

Fonte: GUIMARÃES, A. P., RIBEIRO, C., BASTOS, L., et al. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Grupo de Trabalho de Energia Solar. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br> >. Acesso em 18 mai. 2016.

2.4 Energia solar no Brasil

O sol é um recurso energético inesgotável, porém pouco utilizado ainda no Brasil para geração de energia elétrica. Sua participação na matriz energética brasileira representa cerca de 0,1% do total (Figura 8).

Figura 8 - Distribuição das principais fontes na matriz energética brasileira em 2017

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Matriz energética brasileira. 2016b. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: 18 jan. 2017.

Segundo o Banco de Informação de Geração (BIG) da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), a parcela de geração de energia solar (elétrica) é de apenas 23 MW de um total de 159,7 mil MW de capacidade total instalada no Brasil (Tabela 1) (ANEEL, 2017b).

Tabela 1 - Geração de energia elétrica no Brasil

Fonte			Capacidade Instalada			Total		
Origem	Fonte Nível 1	Fonte Nível 2	Nº de usinas	kW	%	Nº de usinas	kW	%
Biomassa	Agroindustriais	Bagaço de Cana de Açúcar	398	10.897.104	6,822	416	11.009.959	6,892
		Biogás-AGR	3	1.822	0,001			
		Capim Elefante	3	65.700	0,041			
		Casca de Arroz	12	45.333	0,028			
	Biocombustíveis líquidos	Etanol	1	320	0,000	3	4.670	0,003
		Óleos vegetais	2	4.350	0,003			
	Floresta	Carvão Vegetal	8	54.097	0,034	88	3.048.248	1,908
		Gás de Alto Forno - Biomassa	11	332.265	0,208			
		Lenha	2	14.650	0,009			
		Licor Negro	17	2.261.136	1,416			
		Resíduos Florestais	50	386.100	0,242			
		Resíduos animais	Biogás - RA	11	2.099	0,001	11	2.099
	Resíduos Sólidos Urbanos	Biogás - RU	15	114.680	0,072	15	114.680	0,072
Eólica	Cinética do vento	Cinética do vento	414	10.439.542	6,535	414	10.439.542	6,535
Fóssil	Carvão Mineral	Calor de Processo - CM	1	24.400	0,015	23	3.612.995	2,262
		Carvão Mineral	13	3.389.465	2,122			
		Gás de Alto Forno - CM	9	199.130	0,125			
	Gás Natural	Calor de Processo - GN	1	40.000	0,025	158	13.004.582	8,141
		Gás Natural	157	12.964.582	8,116			
	Outros fósseis	Calor de Processo - OF	1	147.300	0,092	2235	10.155.186	6,357
		Gás de Refinaria	7	339.960	0,213			
		Óleo Combustível	41	4.056.773	2,540			
		Óleo Diesel	2170	4.802.525	3,006			
		Outros Energéticos de Petróleo	17	955.928	0,598			
Hídrica	Potencial Hidráulico	Potencial hidráulico	1244	98.016.876	61,360	1244	98.016.876	61,36
Nuclear	Urânio	Urânio	2	1.990.000	1,246	2	1.990.000	1,24
Solar	Radiação Solar	Radiação solar	42	23.008	0,014	42	23.008	0,014
Importação	Paraguai	-		5.650.000	3,537	-	8.170.000	5,115
	Argentina			2.250.000	1,409			
	Venezuela			200.000	0,125			
	Uruguai			70.000	0,044			
Total			4.652	159.739.145	100	4.652	159.739.145	100

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Matriz energética brasileira. 2016b. Disponível em:

<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

O Brasil, graças a sua localização geográfica e extensão territorial, possui um alto potencial solar, recebendo energia solar da ordem de 1013 MWh anuais, ou seja, o país recebe 50 mil vezes mais energia solar do que seu consumo anual de eletricidade, de acordo com o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2014, p. 1).

Ainda que as vantagens da energia solar fiquem evidentes, quando os custos ambientais de extração, geração, transmissão, distribuição e uso final de fontes fósseis de energia são comparadas à geração por fontes renováveis, como elas são classificadas, no Brasil esse tipo de geração ainda é incipiente, uma vez que não possui uma cadeia de fornecimento nacional, nem uma legislação específica, como é o caso da energia eólica, tampouco incentivos para a instalação de indústrias e empresas fomentadoras dessa tecnologia. Essa falta de incentivo culmina no paradoxo vivido atualmente pelo país com relação à geração de energia solar. Se por um lado apresenta um grande potencial solar, por outro há o desestímulo a essa

tecnologia, uma vez que os custos para projetos desse tipo são significativamente maiores se comparados com outras tecnologias de geração já consolidadas, como é o caso das hidrelétricas, por exemplo.

Algumas ações estão sendo tomadas visando a inserção definitiva de energia solar na matriz energética brasileira, como é o caso da realização do estudo denominado Atlas Solarimétrico do Brasil, iniciativa da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), em parceria com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) e o Atlas de Irradiação Solar no Brasil, elaborado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pelo Laboratório de Energia Solar (Labsolar) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Os resultados desses estudos demonstram o grande potencial solar brasileiro e as necessidades de incentivos por parte dos órgãos governamentais para difundi-la no país.

2.5 Energia heliotérmica

A tecnologia heliotérmica possibilita a concentração da energia provinda do Sol, que se apresenta naturalmente na forma dispersa. A geração é feita através da conversão de energia térmica em energia mecânica, que depois é convertida em energia elétrica.

A energia solar concentrada é considerada um caminho promissor para processos agroindustriais que demandam calor e energia elétrica, principalmente em regiões com alto potencial de recurso solar, como é o caso do Brasil. Em regiões onde há a possibilidade de utilização da energia proveniente da geração por heliotérmicas, geralmente onde as linhas de transmissão inexistem ou são precárias, ou o custo de geração e transmissão são altos, são favorecidas principalmente pela possibilidade de geração de calor e eletricidade, inseridas no processo industrial do cliente dessas energias (FULLER, 2011; MEKHILEF et al., 2011; QUIJERA et al., 2011a, 2011b; TORA et al., 2010 apud MAAG; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2015, p. 1)

A tecnologia vem ganhando espaço no cenário mundial de geração de energia. Até 2015, a potência nominal registrada em operação, segundo o portal CSP Plaza (2016) era de aproximadamente 4,9 mil MWe. A Espanha e os Estados Unidos são os maiores responsáveis por CSP em operação no mundo (Figura 9).

Figura 9 - Capacidade total instalada pelos principais países (MWe)

Fonte: CSP PLAZA. Global CSP installed capacity increased to 4940 MW by the end of 2015. **CSP Plaza**, 2016. Disponível em: <<http://en.cspplaza.com/global-csp-installed-capacity-increased-to-4940-mw-by-the-end-of-2015.html>>. Acesso em: 16 jan. 2016.

Ainda segundo o portal CSP Plaza (2016), o crescimento de potência instalada de CSP no mundo no ano de 2015 foi de 9,3% em relação ao ano de 2014. Os maiores responsáveis por esse crescimento são o Marrocos e África do Sul com aumento de 160MWe e 150MWe, respectivamente (Figura 10).

Figura 10 - Progressão da capacidade mundial total instalada de CSP (MWe)

Fonte: CSP PLAZA. Global CSP installed capacity increased to 4940 MW by the end of 2015. **CSP Plaza**, 2016. Disponível em: <<http://en.cspplaza.com/global-csp-installed-capacity-increased-to-4940-mw-by-the-end-of-2015.html>>. Acesso em: 16 jan. 2016.

O aumento da capacidade instalada nos países está justificado de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Aumento da capacidade de CSP instalada por país no final de 2015

País	Capacidade total instalada (MWe)	Crescimento da capacidade em 2015 (MWe)	Observações	Taxa de crescimento
África do Sul	150,56	150	A KaXu Solar One, central de produção parabólica com capacidade instalada de 100 MW na África do Sul foi inaugurada em 2 de março de 2015. E a Bokpoort com capacidade instalada de 50 MW foi oficialmente posta em operação em dezembro de 2015	26800%
Marrocos	180	160	A usina NOORI, composta de calhas parabólicas com capacidade de 160MW em Marrocos foi concluída no segundo semestre de 2015. A inauguração foi em 27 de dezembro, mas está temporariamente suspensa	800%
Estados Unidos	1830	110	A nova capacidade instalada é a planta de torre de sal fundida de Duna Crescente com potência de 110MW. Esta planta estava em operação no quarto trimestre de 2015, mas não foi anunciada oficialmente	6,5%
Itália	6,35	1	A usina Rende, combinada biomassa e ciclo solar com 15MWe foi construída pela Falck Renewables na Itália. Com capacidade instalada solar 1MWe foi concluída em 2014 e operada de forma oficial em 2015	18,7%
China	Cerca de 18	0,1	O novo aumento da capacidade instalada é projeto de demonstração de reflexão secundária de Jiangsu Xin Chen com 300kW (térmico)	0,5%

Fonte: Adaptação autor de: CSP PLAZA. Global CSP installed capacity increased to 4940 MW by the end of 2015. **CSP Plaza**, 2016. Disponível em: <<http://en.cspplaza.com/global-csp-installed-capacity-increased-to-4940-mw-by-the-end-of-2015.html>>. Acesso em: 16 jan. 2016.

A Espanha, com maior capacidade instalada no mundo não teve aumento de sua capacidade devido à deterioração das políticas de energias renováveis. A Índia, que possui 205 MWe de CSP instalados, não teve a implantação dos projetos previstos para 2015 concluídos.

Segundo o mesmo portal, em 2018 estão previstas as conclusões de diversos projetos que juntos deverão somar cerca de 1GWe de capacidade instalada.

2.5.1 Tecnologias de geração de energia heliotérmica

Existem quatro tecnologias para geração de energia CSP: Refletor Linear Fresnel, Cilindro Parabólico, Disco Stirling e Torre de concentração. A classificação, segundo a Agência Internacional de Energia (IEA) é dada a partir do seu foco – linear ou pontual – e o receptor – fixo ou móvel (MILANI, 2016). Na Figura 11 observam-se os diferentes tipos de CSP, segundo essa classificação.

Figura 11 - Classificação dos tipos de tecnologias CSP

Fonte: MILANI, R. F. A. T. **Hibridização de energia heliotérmica com gaseificação de bagaço para geração de energia elétrica**. 2016. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/rmilani.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2016.

Além das características citadas para descrição das tecnologias, outras distinções podem ser delimitadas no processo de cada uma, como temperatura de operação, potência, custo nivelado e fator de operação (MILANI, 2016), conforme descrito na Tabela 3.

Tabela 3 - Características das tecnologias CSP

		Tecnologia CSP				
		Unidade	Lineal Fresnel	Cilindro Parabólico	Receptor Central	Disco Parabólico
Parâmetros técnicos	Potência típica por usina	MWe	1-200	10-200	10-200	0,01-0,40
	Temperatura de operação	°C	50-300	50-400 (típico 390°C)	300-2.000 (típico 565°C)	150-1.500 (típico 750°C)
	Eficiência pico	%		20,0	23,0	29,4
	Eficiência líquida (média anual)	%	8-10	11-16	15-30	20-30
	Fator de concentração	vezes	25-200	80-200	300-1.000	1.000-4.000
	Potência instalada até março 2014	MWe	53,26	3.406,7	496	1,5
Parâmetros comerciais	Estágio comercial		Protótipos-demonstração	Disponível comercialmente	Demonstração	Protótipos-demonstração
	Maturidade tecnológica		Madura	Muito madura	Mais recente	Recente
	Risco tecnológico		Médio	Baixo	Médio	Alto
	Armazenamento de eletricidade		Limitado	Limitado	Sim	Baterias
	Desenhos híbridos		Sim	Sim	Sim	Sim
	Demanda de área		Médio	Grande	Médio	Pequeno
	Custo relativo		Muito baixo	Baixo	Alto	Muito alto
Parâmetros econômicos	Custo por potência instalada: CAC=com armazenamento de calor; SAC= sem armazenamento de calor; GDV= geração direta de vapor.	USD/W	3,0 (SAC)	3,82 - 8,40 (SAC); 6,65 - 10,50 (CAC, 6h); 2,30 (GDV)	4,0 (SAC); mais de 4,0 (CAC)	12,57 (SAC)
	Custo de O&M	cent. USD/kWhe	...	1,2 - 2	3,4	21

Fonte: MILANI, R. F. A. T. **Hibridização de energia heliotérmica com gaseificação de bagaço para geração de energia elétrica**. 2016. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/rmilani.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2016.

2.5.2 Torre Solar

O conceito de receptor central para concentração e coleta de energia solar é baseado em um campo de espelhos com rastreamento solar individual (heliostatos) que reflete a luz do sol incidente a um receptor na parte superior de uma torre localizada no ponto focal do conjunto de espelhos. Geralmente, 80% a 95% da energia refletida é absorvida pelo fluido de trabalho, que é bombeado geralmente para um trocador de calor ou diretamente numa turbina. O fluido aquecido retorna ao trocador

ou turbina, em seguida, seu calor de rejeito, a uma demanda térmica, como uma usina elétrica térmica ou um processo industrial que exija calor (Figura 12).

Figura 12 - Esquema simplificado de geração de energia heliotérmica por torre

Fonte: Adaptação autor de: PORTAL ENERGIA SOLAR. **Alta temperatura energia solar térmica**. 2015. Disponível em: <<http://pt.solar-energia.net/solar-termica/temperatura-alta>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

O sistema é composto por quatro elementos básicos: o campo de heliostatos, a torre, o receptor e bloco de potência, descritos abaixo:

A altura da torre é limitada pelo seu custo. As áreas laterais expostas ao vento e o peso do receptor são os dois fatores mais importantes no projeto da torre. O peso e o tamanho do receptor são afetados pela escolha de fluidos e sua potência.

Os heliostatos (Figura 13) são compostos de um painel de diversos espelhos, em vez de um grande espelho único somando aproximadamente 14 m² de superfície. Os espelhos de vidro são apoiados em um perfil metálico com revestimento protetor com alturas diferentes para formar uma superfície côncava de espelhos. Cada painel individual no heliostato também é voltado para um ponto no receptor. A distância focal deste heliostato é aproximadamente igual à distância do receptor ao mais distante heliostato. O movimento de seguimento solar é realizado através de motores e atuadores, gerenciados por softwares.

Figura 13 - Parte posterior de um heliostato com motores de atuação

Fonte: Própria autoria.

O receptor, colocado no topo de uma torre, está localizado em um ponto onde a energia refletida dos heliostatos pode ser interceptada de forma mais eficiente. O receptor absorve a energia que está sendo refletida no campo de heliostatos e transfere-a em um fluido de transferência de calor (Figura 14).

Figura 14 - Receptor e heliostatos

Fonte: PORTAL ENERGIA HELIOTÉRMICA. **Existem projetos heliotérmicos no Brasil?** Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/fatos/existem-projetos-heliotermicos-no-brasil>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

O fluxo do campo de heliostatos é refletido através de uma abertura para absorção de superfícies que formam as paredes da cavidade. Projetos típicos têm uma área de abertura de cerca de um terço à metade da superfície do absorvente interno.

A diferença básica entre o conceito de receptor central de coleta de energia solar e da calha cilindro-parabólica ou coletores de disco parabólico é que, neste caso, toda a energia solar a ser coletada em todo o campo, será transmitida óticamente a um receptor de pequena região central, em vez de ser canalizado em torno de um campo com fluido quente, reduzindo assim a área de perda de calor e percurso a ser percorrido pelo fluido. Devido a esta característica, os sistemas de receptor central são caracterizados por níveis de potência de grande porte (até 500 MW por sistema) e altas temperaturas (540-840 °C).

O bloco de potência é composto por um gerador e uma turbina CCCE (Ciclo Combinado de Calor e Eletricidade), que produz energia elétrica e energia térmica a partir de uma variedade de combustíveis e consegue um rendimento global próximo de 80%. A turbina é projetada para instalação interna ou externa e tem o ar de admissão retirado do ambiente externo.

Pode ser operada durante os dias com céu claro com energia solar e em dias de céu nublado e a noite com biodiesel produzido na região de sua instalação ou com recuperação de calor do sistema de armazenamento.

A unidade de cogeração é dividida nas seguintes partes principais:

- Motor de turbina a gás e recuperador
- Gerador elétrico
- Sistema elétrico
- Trocador de calor de gases de exaustão
- Sistema de supervisão e controle

A quantidade de energia gerada é diretamente proporcional às dimensões da superfície refletora. Quanto maior for a mesma, mais raios são refletidos, obtendo-se temperaturas mais elevadas no foco. O caráter modular faz com que ela seja ideal para geração descentralizada de energia elétrica.

A possibilidade de cogeração de energia no sistema (pelo menos na geração adicional de calor) é uma vantagem adicional desta tecnologia. Isso significa que, dependendo da localização da planta, e da possibilidade de instalar projetos integrados agroindustriais, esse processo pode otimizar demandas energéticas existentes, com maior viabilidade técnica do sistema.

O sistema pode usar centenas de heliostatos que estão encarregados de refletir a luz solar sobre o receptor, concentrando a radiação. Adicionalmente à geração de eletricidade, ainda é possível, com a tecnologia de torre, promover o melhor aproveitamento termodinâmico do sistema por meio da cogeração (eletricidade e calor).

Esse tipo de proposta é ideal para a utilização em sistemas com demanda combinada, favorecendo a eficiência energética agregada e a partir do projeto, derivam outras oportunidades de pesquisa para geração de energia e integração de tecnologias, como a apresentada nessa pesquisa.

2.6 Sistemas heliotérmicos no Brasil

O crescimento de atividades econômicas, aumento das restrições ambientais e abertura de mercados, levaram a retomada da geração elétrica próxima ao local de consumo, chamada de Geração Distribuída (GD).

A concepção tradicional de sistemas elétricos de potência, baseados em grandes usinas distantes dos pontos de consumo, tem-se mostrado cada vez mais difícil de ser implementada em diversos países. Em relação a preocupações ambientais, a busca pela GD está atrelada a dois fatores principais. Primeiro: pode ser visto como uma ferramenta para preencher os nichos do mercado, respondendo de um modo flexível a condições de mercado variáveis. O segundo fator apoia-se na política ou preocupação ambiental que é a força motriz principal para a demanda em busca de energia limpa, além de soluções de custo-eficiência.

Em conformidade com os cenários macroeconômicos de mais longo prazo formulado, os estudos do Plano Nacional de Energia 2030 (EPE, 2008, p. 25-70) sinalizam ainda, para os próximos 25 anos, um forte crescimento na demanda de energia primária no Brasil.

O fortalecimento da política de geração de energia renovável e diversificação da matriz energética, reafirmado no Brasil na última década com a consolidação da geração eólica, abriu portas para a implementação da energia solar em larga escala.

Atualmente no Brasil estão em curso alguns projetos de geração de energia heliotérmica. Um desses projetos prevê a construção de duas usinas de concentração solar de torre, com capacidade nominal de 100 kW cada uma, sendo uma na cidade de Pirassununga, estado de São Paulo e outra na cidade de Caiçara do Rio dos Ventos, no Rio Grande do Norte. O projeto é coordenado pelo Grupo de Pesquisa em Reciclagem, Eficiência Energética e Simulação Numérica (GREEN) da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA/USP). O projeto tem como objetivo a internalização de tecnologia e conta com o apoio de engenharia do Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (Centro Aeroespacial Alemão – DLR, 2005 em alemão) e financiamento não reembolsável pelo Fundo Tecnológico (FUNTEC) do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES).

Outro projeto em curso é a iniciativa conjunta do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e Ministério de Minas e Energia (MME) com execução pelo Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL) e Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF). O projeto conta com a instalação de 1MW de calhas parabólicas em Petrolina, no estado de Pernambuco. O objetivo principal do projeto é

inserir a tecnologia no mercado nacional, com a avaliação do potencial da região Nordeste.

O Laboratório Solar Térmico da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) possui como resultado do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da ANEEL “Sistema Híbrido Solar Biomassa - SHSB”, financiado pela Companhia Piratininga de Força e Luz, Companhia Paulista de Força e Luz e Rio Grande Energia (CPFL) dois sistemas de concentrador com motor Stirling com 1kWe de potência cada.

O laboratório possui também um sistema do tipo Ciclo Orgânico Rankine (Organic Rankine Cycle – ORC em inglês) com potência de 5 kWe. O sistema coletor é interligado ao trocador de calor, faz a função de evaporador do ciclo de potência.

Além desses dois projetos, o laboratório conta com um sistema gaseificador/motor de 6kWe de potência. Utilizado para gaseificação de aparas de madeira e posterior utilização desse gás como combustível do motor de combustão interna de 10kWe.

O último projeto relatado de importância nacional trata-se da central de torre solar projetada para 3 MW a ser instalada ao lado da usina térmica da Petrobrás localizada no Vale do Açu, no Rio Grande do Norte. O projeto será realizado em parceria com o Centro de Tecnologias do Gás e Energia Renovável (CTGAS-ER), a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e tem como objetivo geração de energia para o tratamento e separação de petróleo, bem como utilização nos edifícios da empresa (PORTAL ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2017).

No que tange sistema híbrido comercial com foco no uso de biocombustíveis a empresa brasileira Solinova Inovação Tecnológica e Empresarial LTDA é pioneira nessa tecnologia no país e já está desenvolvendo esse sistema em parceria com programas de produção integrada em comunidades que necessitem de desenvolvimento rural sustentável (GONSALES NETO; CARRER; OLIVEIRA, 2014).

2.7 Energia elétrica a partir de bagaço de cana-de-açúcar

A geração elétrica com a queima do bagaço não é novidade no setor sucroalcooleiro. De fato, a cogeração de energia elétrica como uma prática rotineira nas unidades sucroalcooleiras já tem décadas de existência. O bagaço da cana é o

resíduo sólido que remanesce da moagem da cana-de-açúcar nas usinas de açúcar e destilarias de álcool etílico no país. A proporção desse resíduo depende da quantidade de fibras que as cultivares de cana apresentam. De um modo geral, o material genético em uso no país apresenta um teor aproximado de 270 a 290 kg de bagaço (com 50% de umidade) em cada tonelada de cana processada. Do total produzido nas unidades de produção, uma parcela diminuta (próxima a 10%) é destinada a usos diversos, como a alimentação animal, em especial através de um processo de hidrólise. Toda a parte restante (90%) é queimada em caldeiras no próprio ambiente onde é produzida, para a geração de vapor (BRESSAN FILHO, 2011, p. 2-45).

O funcionamento de uma unidade de produção sucroalcooleira requer o uso de três tipos de energia: térmica, utilizada para o cozimento do açúcar e/ou na destilação do álcool etílico; mecânica, utilizada, na maior parte das unidades para mover as moendas que, por um processo de desfibramento e compressão, retiram o caldo da cana, a sacarose nele presente; e a energia elétrica para a iluminação, funcionamento dos motores e bombas d'água que movimentam todo o sistema fabril. Esta atividade agrícola apresenta uma grande estabilidade temporal e a redução abrupta da safra. A observação do comportamento da safra canavieira no Brasil, nos últimos quarenta anos confirma que a tendência de crescimento anual da produção é uma constante em todos esses anos (OLIVEIRA, 2013, p. 36) (Figura 15).

Figura 15 - Histórico de produção e moagem de cana-de-açúcar

Fonte: UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - ÚNICA. **Ranking de produção de cana, açúcar e álcool**: região centro-sul: safra 2007/2008. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.portalunica.com.br/files/estatisticas/>>. Acesso em: 02 maio 2016.

Os produtos da cana-de-açúcar são obtidos a partir da cana esmagada para produção de açúcar e álcool. São considerados como produtos primários o caldo da cana, melaço, bagaço, pontas, folhas e olhaduras, e como produtos secundários o álcool anidro e hidratado. De cada tonelada de cana esmagada para produção de álcool são obtidos cerca de 0,730 toneladas de caldo de cana.

O bagaço é um resíduo fibroso da extração do caldo pelas moendas. A quantidade produzida depende do teor de fibra da cana processada, apresentando, em média, 46% de fibra e 50% de umidade, resultando, aproximadamente, em 0,280 tonelada de bagaço por tonelada de cana processada. Pela proporção em que é produzido e devido à sua composição, o bagaço constitui-se em um dos mais importantes subprodutos para a indústria sucroalcooleira. Suas principais aplicações são: combustível para caldeira, produção de celulose e na alimentação de gado confinado (AGEITEC, 2014).

A geração de energia elétrica pelo setor sucroalcooleiro, se relaciona com a tecnologia empregada. A grande maioria das usinas possuem caldeiras de média pressão, 22 bar a 300° C, com turbina de estágio simples (COELHO, 1999, p. 54 apud SOUZA; AZEVEDO, 2006, p. 2).

2.8 Simulações realizadas a partir de ferramentas computacionais

Alguns trabalhos de simulação e modelagem de inserção de tecnologia heliotérmica em sistemas produtivos e de geração de energia estão sendo realizados no Brasil, como é o caso do trabalho abordado por Maag et al. (2016) no Congresso Brasileiro de Energia Solar. Os autores, através de simulação em sistemas similares, analisaram o desempenho de plantas solares híbridas. Outro autor que utilizou o sistema computacional para simulação de planta heliotérmica foi Corgozinho (2014). Nesse caso, o autor verificou a viabilidade de armazenamento térmico da planta através de sal fundido, verificando a disponibilidade de calor após o pôr do sol.

Já Castro (2015), utilizou o software SAM para simular o valor do custo de energia heliotérmica no âmbito do Sistema Interligado Nacional (SIN). No estudo, o autor analisou, através de simulações a inserção de energia heliotérmica no sistema nacional de rede de energia, a partir de armazenamento térmico.

Milani (2016) realizou um estudo de hibridização de energia heliotérmica com gaseificação de bagaço, no qual utilizou o sistema SAM para definir custos de implantação do sistema heliotérmico e comparação entre as plantas. Segundo esse mesmo autor, diversos autores utilizam o software para simulação de plantas heliotérmicas (SAM/NREL, 2013 apud MILANI, 2016, p. 51).

Por fim, Sória et al. (2015) utilizou o software SAM para modelar uma planta híbrida solar com biomassa de jurema preta (*Mimosa tenuiflora*) no Nordeste brasileiro.

3 OBJETIVO

O objetivo da pesquisa é analisar, a partir de simulação computacional, a economia de bagaço de cana-de-açúcar com a hibridização de energia solar concentrada em uma usina sucroalcooleira para um ano típico de safra, com dados de um ano meteorológico típico.

4 METODOLOGIA

Foi utilizado o software SAM capaz de mensurar o desempenho energético de sistemas heliotérmicos híbridos, por meio de dados técnicos característicos de cada componente do sistema e de valores reais de intensidade solar para uma dada localidade. Além de gerar valores de custo capital direto e indireto, como também custo nivelado da energia solar produzida.

Para tanto, utilizou-se os dados solares captados na estação meteorológica da Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para o período analisado, que coincide com a mesma área onde está instalada a usina da qual se tiraram os dados utilizados nesse estudo.

Foi dimensionada no SAM uma planta CSP conectada à usina sucroalcooleira estudada, gerando vapor de água para o bloco de potência da usina. A partir desse dimensionamento foram realizadas as simulações descritas.

Assim, as atividades para atingir os objetivos propostos se deram através das seguintes etapas:

- **Dados solarimétricos.** Os dados solarimétricos foram coletados a partir da estação meteorológica instalada na da Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, na mesma região da usina sucroalcooleira utilizada na pesquisa;
- **Seleção da Tecnologia heliotérmica de torre:** Foi realizado um detalhamento para a identificação e caracterização do tipo de tecnologia que mais se adequa à aplicação agroindustrial investigada. A tecnologia CSP de torre apresenta melhor flexibilidade para essa integração, por conta do dimensionamento do campo dos heliostatos, que pode ser alterado de acordo com a necessidade do bloco de potência da usina sucroalcooleira;
- **Definição dos componentes:** com base nas informações da etapa anterior, o sistema mais adequado e os seus componentes foram dimensionados de modo a se ajustar à aplicação agroindustrial prevista;
- **Diagrama esquemático de desenvolvimento da simulação:** Construção do fluxograma de desenho da planta;

- **Dimensionamento do campo solar:** Em função da potência nominal do bloco de potência existente na atividade agroindustrial, a área do campo solar foi definida.
- **Caracterização do consumo da usina sucroalcooleira:** Levantamento de dados do balanço energético referente ao ano de 2015, com as formas e valores de consumo energético mensal / anual da usina;
- **Principais parâmetros de operação:** Foi realizada uma análise individual dos principais parâmetros de operação, do consumo e dos indicadores de desempenho da usina, para se estabelecer um diagrama de fluxo do sistema CSP-híbrido com receptor de torre central;
- **Desenvolvimento da Simulação Transientes Dinâmica por meio do software SAM:** O sistema CSP-híbrido ideal foi definido (em termos de tamanho e localização) e os seus requisitos de energia (eletricidade, calor de processo, temperatura de calor de processo, distribuição diária / sazonal);
- **Execução das Simulações:** Simulação do modelo dinâmico estabelecido, em particular com valores de temperatura do receptor, de eletricidade e calor gerado, fração solar e fração do bagaço.

4.1 Configuração e sequência de desenvolvimento do sistema

O dimensionamento da Usina de Bioenergia CSP-híbrida, foi configurado com diferentes níveis de alimentação suplementar, tanto de fonte solar quanto de biomassa, por meio da realização de uma sequência lógica de etapas, buscando-se encontrar a situação ideal de cogeração de energia.

As premissas adotadas foram inspiradas em pesquisas anteriores disponíveis (HUSSAIN; NORTON; DUFFY, 2017; NIXON; DEY; DAVIES, 2012; PETERSEIM et al., 2014a; PETERSEIM et al., 2013b; SORIA et al., 2015). Os parâmetros considerados foram: fração de hibridização (FH), eficiência ótica do campo solar (CS), múltiplo solar ideal e Custo Nivelado da Energia gerada (LCoE). A Figura 16 apresenta o fluxograma de desenho da planta CSP-híbrida. Assim, as premissas adotadas para o desenvolvimento do trabalho, conforme apresentadas na Figura 16 pode ser descrita pelas seguintes etapas:

- A. Necessidade de recursos solar e de biomassa: As premissas básicas para a integração das plantas são os dois combustíveis para geração de energia;
- B. Quatro principais hipóteses para dimensionamento da tecnologia CSP
 - a. Fração de Hibridização (FH): percentual de geração de energia para cada tipo de combustível, considerando a necessidade do sistema nos períodos de geração (safra, entressafra, dia e noite);
 - b. Otimização ótica do Campo Solar (CS): Os dados utilizados na simulação foram tratados no software Solar Pilot, a fim de se considerar as perdas de energia;
 - c. Otimização do Múltiplo Solar (MS): Melhor condição de geração com relação à fatores técnicos do sistema e custo;
 - d. Custo do campos solar.
- C. Equilíbrio de hibridização: A planta deve produzir mais eletricidade com o bagaço de cana-de-açúcar do que com a energia solar, visando otimização de custo de geração;
- D. O custo nivelado de energia deve ser menor que 11,3 cUSD/kWh, de acordo com custo encontrado nas simulações de Sória et al. (2015), que considerou parâmetros de custo de geração para energia heliotérmica no Brasil.

Figura 16 - Fluxograma do desenho da usina híbrida CSP - Bagaço de cana-de-açúcar

Fonte: Adaptado de SORIA, R. et al. 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, Nov. 2015.

4.2 Caracterização do consumo da usina sucroalcooleira

A pesquisa foi fundamentada também em dados do balanço energético do ano de 2015 de uma usina sucroalcooleira do estado de São Paulo. 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 4 apresenta o balanço de energia do sistema analisado.

Tabela 4 - Balanço de energia da usina no ano de 2015

Balanço de energia	
Energia Gerada (MWh)	182.226
Energia Consumida (MWh)	54.400
Energia Exportada (MWh)	127.826

Fonte: Dados coletados da usina

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 a necessária no processo. 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. Essa dinâmica de processo ocorre em função da safra. A Tabela 5 apresenta a caracterização operacional da usina.

Tabela 5 - Caracterização operacional da usina

Caracterização operacional	
Safra	Abr.-Nov. (8 meses)
Horas de operação	5760
Cana processada (t)	1.700.000
Cana processada / hora	300 ton/h
Demanda	358 kWh/t cana
Consumo interno	9.3 MWh

Fonte: Dados coletados da usina

Usinas sucroalcooleiras operam em função da duração da safra, que variam em média de sete a oito meses (CASTRO; FRANCO; MUTTON, 2014). O resíduo da moagem da cana é usado na alimentação das caldeiras. Entretanto o fornecimento de bagaço excedente para processos industriais, ou para a produção de vapor e geração de energia elétrica, não pode ser realizado de forma direta e contínua, havendo a necessidade de se organizar em estoques grandes quantidades de bagaço. Isso permite que os períodos de geração sejam manejados em função do consumo interno e da obrigatoriedade de fornecimento de energia, como ocorrem em contratos de energia elétrica. Essa característica de operação abre frente para novas linhas de investigação que favoreçam a introdução de uma nova fonte de energia para tais sistemas produtivos. A Tabela 6 apresenta o volume disponível de biomassa oriunda do processamento de cana de açúcar, no estudo apresentado referente a Safra de 2015.

Tabela 6 - Volume disponível de biomassa (Safrá 2015)

Disponibilidade de biomassa sazonal (t)	
Bagaço (50%)*	467.500
Palha (t)	10.000
Cavaco (t)	28.000
Total (t)	505.500
Relação (t/MWh)	2.77

*Umidade do bagaço no momento da queima

Fonte: Dados coletados da usina.

O bagaço de cana in natura resultante do processo de moagem apresenta densidade aparente de 120 kg/m³ (PETROBRÁS, 1982). O bagaço recém-moído possui cerca de 50% de umidade, 45% de fibras lignocelulósicas, de 2 a 3% de sólidos insolúveis e de 2 a 3% de sólidos solúveis.

4.3 Irradiação solar

Os dados meteorológicos foram obtidos na Estação Climatológica processados no Laboratório de Radiometria Solar, situado na Faculdade de Ciências Agrônômicas/UNESP em Botucatu - SP. Os dados para a radiação solar foram calculados a partir do modelo FRD (Feixe de Radiação Direta) sobre uma superfície horizontal com acompanhamento Leste-Oeste, usando um pireliômetro acoplado ao um sistema rastreador solar. Os dados coletados são da mesma região onde se encontra a usina sucroalcooleira estudada.

Para esse estudo, foi utilizado o Ano Meteorológico Típico (AMT) referente aos períodos de 2006 a 2008 (Figura 17).

Figura 17 – Radiação direta - Ano Meteorológico Típico 2006-2008

Fonte: Ano típico solar referente aos dados coletados da Estação Climatológica do Laboratório de Radiometria Solar, situado na Faculdade de Ciências Agrônômicas/UNESP em Botucatu – SP, no período de 2006 a 2008.

4.4 Caracterização Ótica do Campo Solar

Subsequente, a caracterização ótica do campo solar foi obtida com os valores de desempenho ótico e da relação campo solar / receptor de torre central. A otimização e caracterização de campos de heliostatos foram realizadas anteriormente (BUCK, 2013; LI et al., 2016).

Para essa caracterização, o campo solar adotado como ideal foi com MS 1, dimensionado para fornecer energia para um bloco de potência nominal 31 MW_e. A distribuição ideal final dos heliostatos no campo solar (Figura 18 (A)) foi otimizada em função do movimento solar, da geometria do campo e da altura da torre. A área de reflexão requerida de um campo solar para um determinado nível de potência nominal de uma planta é reduzida com um aumento da eficiência ótica (BUCK, 2012).

Ainda mais, o perfil do fluxo térmico no receptor central (Figura 18 (B)) foi obtido como forma de mensurar as perdas por derramamento, bem como também parte do processo de dimensionamento da geometria do campo solar ideal em relação à altura da torre.

Figura 18 - Eficiência ótica do campo solar (A) e perfil do fluxo solar no receptor (B)

Fonte: Resultados Solar Pilot

O processo de otimização do campo solar foi uma premissa importante para a simulação de desempenho energético e obtenção do custo de energia gerada no software SAM. As melhorias no desempenho óptico são cruciais para a redução de custos do capital (BUCK, 2012). A eficiência ótica do campo solar ficou majoritariamente acima do 70%. O desempenho de cada variável se forma em função de parâmetros: (i) efeito cosseno, (ii) sombreamento e bloqueio; (iii) derramamento; (iv) atenuação, poeira e refletividade dos espelhos.

O aumento do desempenho térmico do receptor diminui o tamanho requerido do campo de heliostato e o custo de capital associado (LI et al., 2016). O receptor tem capacidade de 97.8 MWt e está localizado no topo de uma torre de 142 m. A Figura 19 ilustra os valores de energia absorvida (A) e energia incidente no receptor (B).

Figura 19 - Energia térmica absorvida (A) e Energia térmica incidente no receptor (B)

Fonte: Resultados Solar Pilot

A Tabela 7, apresenta valores que caracterizam o desempenho ótico do campo solar (CS) como também valores do desempenho térmico do receptor, calculados a partir dos dados de saída do software Solar Pilot.

Tabela 7 - Valores do desempenho ótico do CS e do desempenho térmico do receptor

Campo Solar		Receptor	
Energia incidente no CS	149 MW	Interceptação	89%
Energia absorvida pelo receptor	97 MW	Eficiência de absorção	94%
Energia absorvida pelo HTF	88 MW		
Eficiência óptica de CS	69.5%	Fluxo incidente médio	423 kW/m ²
Efeito Cosseno	85.7%	Fluxo incidente máximo	802 kW/m ²
Atenuação	96%		
Bloqueio	99%		
Sombreamento	99%		
Refletividade	91%		

Fonte: Resultados Solar Pilot

4.5 Descrição do sistema híbrido

Este estudo descreve o processo de aquisição de dados e gera um arquivo SAM com entradas explícitas. Os resultados foram obtidos de simulações modeladas por meio da ferramenta SAM (v.2016.3.14).

O modelo criado prediz uma saída de energia anual proporcional aos valores de entrada, do recurso solar, disponibilidade de biomassa e ao rendimento de cada componente (NREL, 2013).

A tecnologia escolhida nesse sistema é uma planta CSP com torre central para produção direta de vapor. De acordo com a capacidade da central de potência da usina sucroalcooleira foram dimensionados os valores de entrada do SAM com o ponto de desenho do sistema CSP, simulado com múltiplo solar 1, para fornecimento integral da energia requerida por fonte solar para posterior variação do múltiplo solar de acordo com o despacho programado de cada fonte de energia e períodos distintos.

Inicialmente, foi dimensionada uma usina CSP convencional, como forma de idealizar a utilização da tecnologia de torre central, sem a fração de alimentação híbrida, a fim de se obter valores de geração e configuração a serem comparados com os resultados obtidos subsequentes. O sistema CSP tem capacidade de geração nominal 36 MW_e (bruto) e 31.3 MW_e (líquido), sendo 100% suprido por fonte solar. A área de reflexão requerida abrange um pouco mais de 15 ha (Tabela 8).

Tabela 8 - Descrição nominal da Usina CSP-híbrida

Descrição de entrada SAM (ponto de dimensionamento)		
	Variável	Estudo C1
Clima	Localização	Botucatu
	Recurso Solar	2100 Kwh/m ² /ano
Campo solar	Abertura Heliostato	148 m ²
	N° Heliostatos	1070
	Abertura CS	149.225 m ²
	Área do Campo	70 ha
	Multiplicador da área do CS	1
	Ponto de design DNI	950 W/m ²
	Múltiplo Solar	1
	Veloc. do vento segura	15 m/s
	Distância Max. Torre	4.2
Receptor de Cavidade	Torre	142 m
	Altura	9.7
	Diâmetro	11.8
	Temp. de saída HFT	-
	Fluxo Máximo	802 kWt/m ²
	Energia térmica	97.8 MWt
	Estimativa de perda de calor	1
	Absorção do revestimento	94%
	Emitância do revestimento	88%
	Energia de saída do CS	97.8 MWt
	Energia de saída do Receptor	88.8 MWt
	Energia de entrada do BP	-
Característica de operação	Armazenamento térmico (h)	0
	Energia de saída Bruta	36 MW
	Energia de saída Líquida	31.3 MW
	Energia térmica	130 MWt
Alimentação Híbrida	Períodos 1 - 3	
	Fração 30 – 100%	
Parasítico	Coef. de perda de tubulação	10200 Wt/m

Fonte: Parâmetros simulação SAM

O campo solar com torre de receptor central consiste em 1.075 Heliostatos voltados para norte (N) e distribuídos em arcos circulares ao redor da torre, com área total de reflexão 155.203 m². A área total do campo solar ideal foi de 73 ha (Figura 20 - A). Os heliostatos representam a maior influência no preço final da energia gerada por sistemas CSP. Kolb et al. (2007) assumiu que, o preço de US\$ 100/m² é um

objetivo razoável a ser alcançado e pode tornar a tecnologia CSP competitiva no mercado aberto.

O modelo utilizado foi o *Advanced Thermal Systems* (ATS), de elevação-azimutal, com 148 m² (Figura 20 – B) (KOLB et al., 2007).

Figura 20 - Coordenadas dos heliostatos no campo solar (A) e Heliostato (ATS) 148 m² (B)

Fonte: KOLB, G. J. et al. **Heliostat cost reduction study**. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, 2007.

O sistema termodinâmico adotado foi um Ciclo Rankine convencional para geração direta de vapor, superaquecido a 550° C e 160 bar, sem armazenamento térmico. Sistemas CSP sem armazenamento são mais favorecidos com a geração direta de vapor (PETERSEIM et al., 2014). O vapor superaquecido disponibilizado na entrada da turbina 90 MWt, na qual está conectado um gerador de eletricidade. A planta usa sistema de refrigeração úmido para condensar o vapor de volta para o estado líquido.

A combinação de turbinas a vapor e condensadores em plantas CSP híbridas, com biomassa e tecnologia torre, tem potencial para suprir a demanda energética requerida no receptor central (PETERSEIM et al., 2014). Essa concepção foi investigada anteriormente e se mostrou adequada para sistemas integrados híbridos de biomassa e torre solar (PETERSEIM et al., 2013b).

4.6 Parâmetros financeiros do sistema

As premissas econômicas adotadas na modelagem do sistema incluíram os custos do capital direto e indireto, custos de manutenção e operação, bem como as taxas de desconto, imposto, inflação, custo da biomassa combustível, da eletricidade e da água, apresentado na Tabela 9 e na Tabela 10.

Tabela 9 – Parâmetros financeiros do sistema híbrido

Geral	Período	30 anos
	Inflação	7%
Impostos e seguro	Taxa de desconto	10%
	Imposto federal	27%
	Seguro	0.5% do custo capital
Parâmetros de empréstimo	Longo prazo	20 anos
	Taxa de empréstimo	7% p.a.
	Fração de débito	80%
Modo de solução	Objetivo TIR*	Sim
TIR objetivo real	TIR mínimo requerido	10% p.a.
Depreciação	Depreciação	5 anos (MACRS)

*TIR – Taxa Interna de Retorno.

Fonte: Adaptado de SORIA, R. et al. 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, Nov. 2015.

A vida útil adotada para a planta foi de 30 anos, comissionamento em 2016, 65% do financiamento da dívida, taxa de juros de dívida de 7%, taxa de desconto de 7% e taxas internas de retorno de investimento de 11%, bem como as taxas escaladas dos preços da inflação, do combustível, da eletricidade e da água.

O investimento mostrado é o custo total do projeto do proprietário, consistindo no preço de engenharia, aquisição e construção e no custo de licenças, gerenciamento de projetos, aspectos legais e financeiros de um projeto de usina. A conexão de rede também está incluída.

As variáveis financeiras relativas ao bloco de potência, receptor e fluidos térmicos foram mantidas. No entanto o valor relacionado ao campo solar foi configurado com base no adotado por Soria et al. (2015) (Tabela 10).

Tabela 10 - Custos totais associados ao sistema híbrido

Custo do capital direto	Melhorias do local	-
	Campo de Heliostatos	USD 18,508,850.00
	Torre	USD 14,958,846.00
	Receptor	USD 25,344,354.00
	Armazenamento Térmico	-
	Alimentação Auxiliar	R\$/KWe
	Balanço da planta	R\$/KWe
	Bloco de Potência	120,00 USD/kWe (10%)
	Contingência	7%
Capital indireto	CPE e custos de proprietário	11% dos custos diretos
	Terra	0 US\$/ha
Custos de O & M*	Custo anual fixo	
	Custo Fixo por Capacidade	US\$/KW/ano
	Custo Variável por Geração	5 USD/MWh
	Custo do combustível fóssil	2,85 USD/MMBTU
	Estimativa da força de trabalho (O & M)	-

*O&M – Operação & Manutenção

Fonte: Adaptado de SORIA, R. et al. 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, Nov. 2015.

4.7 Configuração do sistema com fonte híbrida

Para essa pesquisa, uma importante etapa foi a caracterização do perfil do consumo energético da atividade agroindustrial em estudo apropriado para a região.

Isso devido ao fato de que a fração de energia proveniente da fonte híbrida será distribuída e configurada em função de três principais parâmetros: o consumo interno de energia, a disponibilidade de biomassa e recurso solar para o estado de São Paulo.

O cenário consistiu em quatro períodos, distribuídos em 24 horas e 12 meses, subdivididos em safra e entressafra, diurno e noturno. Dessa forma, a configuração adotada no sistema apresentou as seguintes situações (Figura 21):

- 1 – Período de safra noturno: Há disponibilidade de bagaço de cana-de-açúcar e não há disponibilidade solar;
- 2 – Período de entressafra noturno: Não há disponibilidade solar e nem de bagaço de cana-de-açúcar;
- 3 – Entressafra diurno: Não há disponibilidade de bagaço de cana-de-açúcar e há disponibilidade solar;
- 5 – Safra diurno: Há disponibilidade solar e de bagaço de cana-de-açúcar.

Figura 21 - Períodos de programação da fração híbrida no bloco de potência

	12am	1am	2am	3am	4am	5am	6am	7am	8am	9am	10am	11am	12pm	1pm	2pm	3pm	4pm	5pm	6pm	7pm	8pm	9pm	10pm	11pm
Janeiro	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
Fevereiro	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
Março	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
Abril	1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1
Maio	1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1
Junho	1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1
Julho	1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1
Agosto	1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1
Setembro	1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1
Outubro	1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1
Novembro	1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1
Dezembro	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2

Fonte: Parâmetros simulação SAM

A planta foi dimensionada sem armazenamento térmico, porém com alimentação híbrida por meio da combustão da biomassa de cana. O sistema de hibridização foi configurado para fornecer uma fração que variou de 30% – 100% de biomassa durante o dia e a noite, na safra e na entressafra, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Configuração do sistema de hibridização

Período			
		Dia	Noite
		Fração Híbrida	
	Safra	30 - 100%	100%
	Entressafra	30 -100%	100%

Fonte: Própria autoria.

A capacidade de despacho de energia aumenta em sistemas CSP-híbridos com o fornecimento de biomassa como fonte auxiliar (PETERSEIM et al., 2014). A distribuição de despacho configurado para a Usina CSP-Híbrida, variou em função das horas de sol e do período de safra. Sob este esquema de fornecimento de energia ao bloco de potência, o sistema foi dimensionado e otimizado em função da energia gerada, do fator de capacidade, do múltiplo solar e do LCoE.

6 RESULTADOS

A otimização do múltiplo solar foi necessária para obtenção de valores de geração de energia, com diferentes configurações da utilização da fonte solar disponível, como também do número de heliostatos requeridos pelo campo solar.

Partindo do princípio de equilíbrio do sistema, o múltiplo solar foi determinado por meio da otimização do custo nivelado da energia (LCoE) (NREL, 2013) em função da programação de entrega da demanda do consumidor, conforme outras pesquisas já realizadas com sistemas CSP-híbridos (SORIA et al., 2015)

Os resultados de otimização do múltiplo solar foram comparados com os obtidos usando o planejamento de entrega energia gerada em função da demanda. Como premissa, foi estabelecido que o campo solar adotado como ideal nunca alimentará com energia térmica a potência total requerida pelo receptor, levando em consideração que o despacho de energia deve vir pelo menos 50% do bagaço de cana de açúcar, a fim de se manter o equilíbrio do sistema analisado. Portanto, a variação do múltiplo solar averiguado foi de 0.1-0.5 (o que corresponde a um despacho solar de 10% a 50% do total de energia). Isso se deve ao fato que, a energia requerida pelo bloco de potência sempre será suprida principalmente por biomassa (Tabela 12).

Tabela 12 - Desempenho energético e custo nivelado da energia

MS	FH	E (MWh)	FC	LCoE (¢/kWh)
0.1	90	229,579	74.7%	10.13
0.2	80	214,509	69.8%	10.43
0.3	70	199,013	64.7%	10.79
0.4	60	182,798	59.5%	11.23
0.5	50	166,475	54.1	11.76

Fonte: Parâmetros de simulação

Os resultados demonstram que o modelo com MS 0.4 e FH 60% é capaz de suprir a demanda de energia requerida pelo sistema, conforme já descrito na Tabela 4, porém com um custo nivelado alto para o sistema proposto. A Figura 22 demonstra os valores de geração de energia e o comportamento do custo nivelado da energia em função da fração híbrida e do múltiplo solar. Os valores do custo nivelado da energia aumentam progressivamente em relação ao múltiplo solar, considerando os fatores de hibridização simulados.

Figura 22 - Geração de energia e o comportamento do custo nivelado

Fonte: Própria autoria.

A segunda etapa dos dados obtidos, expressaram resultados que partiram de uma configuração MS x FH mínima em relação a demanda requerida pelo sistema. O primeiro modelo com MS 0.1 e FH 30% apresentou valores de geração de aproximadamente 10 mil MWh acima da demanda, porém com um baixo múltiplo solar e fator de hibridização, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Desempenho energético e custo nivelado da energia

MODELO	MS	FH%	E (MWh)	FC	LCoE ¢/kWh
1	0.1	30	192,785	70.3%	9.49
2	0.2	40	209,300	76.3%	9.12
3	0.3	50	221,491	80.7%	8.92
4	0.4	60	231,000	84.2%	8.81
5	0.5	70	240,321	87.6%	8.71

Fonte: Própria autoria.

A Figura 23 demonstra o comportamento do custo nivelado da energia, que no modelo 4, com MS 0.4 e FH 60% atingiu o valor atrativo de 8.81 ¢/kWh, porém excedeu a geração de energia verificada no balanço energético da usina no ano típico analisado. Os demais modelos também excederam a capacidade de geração da usina para o ano típico.

Figura 23 - Comportamento do custo nivelado de energia em função do campo solar

Fonte: Própria autoria.

Tendo em vista a otimização do custo nivelado de energia e a capacidade de geração para o ano típico, foram simulados os parâmetros de geração de energia alterando os fatores de hibridização para os múltiplos solares que apresentaram os melhores resultados de custo nas simulações anteriores. Os resultados de geração de energia e custos estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Desempenho energético e o custo nivelado da energia com variação de múltiplo solar

MS	FH%	E (MWh)	FC	LCoE (c/kWh)
0.5	65	192,210	62.5%	10.87
0.4	75	208,154	67.7%	10.47
0.3	85	223,215	72.6%	10.16

Fonte: Própria autoria.

Os modelos configurados demonstram que com um múltiplo solar 0.5 e fator de hibridização 65% é possível atingir a geração da usina para o ano típico analisado a um custo abaixo do referencial para este trabalho.

A Figura 24 apresenta valores de desempenho energético do sistema CSP-híbrido, custo nivelado da energia gerada e fator de capacidade para os casos simulados, com diferentes fatores de hibridização e múltiplos solares.

Figura 24 - Geração de energia e o comportamento do custo nivelado em função do fator de hibridização

Fonte: Própria autoria.

Nos modelos expressos na Figura 24, a fração híbrida 65% e o múltiplo solar 0.5 demonstraram que valor de geração de 192.210 MWh é compatível com o requerido pelo sistema. O custo nivelado da energia para os casos propostos variou 1.18 ¢/kWh. Nas plantas híbridas CSP-biomassa é uma opção bem aceita para diminuir o investimento e o custo nivelado da energia gerada (PETERSEIM et al., 2014).

A usina CSP-híbrida de biomassa poderia suprir bem a demanda diária de energia ao sistema sucroalcooleiro, como também o fornecimento da carga básica de consumo durante a noite.

Nos demais modelos simulados, embora os custos ficaram abaixo, a geração de energia foi superior ao demandado pelo sistema no ano típico.

Com relação à necessidade total do sistema e sobra de biomassa, o modelo configurado de MS 0.5 e FH 65% apresentou o melhor resultado (Figura 25).

Figura 25 - Valores de geração de energia e economia de biomassa dos modelos propostos

Fonte: Própria autoria.

Assim, os resultados apontaram que a fração híbrida necessária para suprir a demanda do bloco de potência é de 65%, com múltiplo solar de 0.5. A sobra de biomassa atingiu 266.598 toneladas (Figura 26)

Figura 26 - Valores de sobra de biomassa (t) e Energia gerada com a sobra (MW_e)

Fonte: Própria autoria.

A quantidade de biomassa que sobra está diretamente relacionada com o múltiplo solar do campo, pois valores maiores propiciam maior aproveitamento do recurso solar e a consequente economia de biomassa do sistema.

O sistema CSP-híbrido dimensionado com o fator de hibridização 65% e múltiplo solar 0.5 tem capacidade de geração nominal 36 MW_e (bruto) e 31.1 MW_e

(líquido), sendo 10.8 MW_e de fonte solar e 20.2 MW_e oriundo da queima da Biomassa. A Tabela 15, apresenta os resultados obtidos com o modelo ideal.

Tabela 15 - Resultados finais obtidos com o modelo ideal: Múltiplo Solar 0.5 e Fração Híbrida 65%

Modelo ideal MS 0.5 / FH 65	
Energia Anual (MWh)	186.242
Sobra bagaço (t)	266.598
E EcoBiom (MWe)	96.245
Fator de Capacidade	67.9%
LCoE (¢/kWh)	9.52

Fonte: Própria autoria.

Finalmente, de acordo com o modelo ideal simulado, a partir da definição dos dados ótimos de múltiplo solar (0.5) e fração híbrida (65%), a economia de bagaço de cana-de-açúcar no período considerado é de 266,59 mil toneladas, o que permitiria a geração adicional de 96,24 mil MWe no período analisado. A geração adicional representa a exportação média de energia de seis meses, considerando que a média mensal exportada é de aproximadamente 16 MWh.

7 CONCLUSÃO

A hibridização de sistemas CSP com energia térmica oriunda da queima de biomassa permite que a usina opere 24 horas por dia. A possibilidade de usar o recurso solar durante o dia permite que a biomassa seja aproveitada durante a noite e em períodos de entressafra. Esse fator permite maior eficiência de geração de energia e maior aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar. O sistema melhor configurado apresentou resultados de horas de operação anual acima de oito mil, o dobro das quatro mil horas que a usina estudada opera atualmente para o mesmo período, desconsiderando paradas por quebra ou manutenção.

A geração distribuída por usina CSP-híbrida integrada em usinas sucroalcooleira pode representar um avanço tecnológico para geração de energia e integração de tecnologias que viabilizem um maior período de geração de energia na entressafra de cana de açúcar, possibilitando fechamento de contrato de energia maior e consequentemente maior fluxo de caixa para as usinas que se beneficiarem dessa integração.

Utilização da radiação como fonte suplementar em usinas termoelétricas que utilizam biomassa como combustível, otimiza o custo de capital e possibilita investimentos para aumentar a garantia de fornecimento e a consequente aquisição de contratos de energia de longo prazo.

Essa pesquisa, abre frente para uma nova etapa que aprofunde em valores econômicos plausíveis, a fim de proporcionar uma análise financeira mais representativa, além de pesquisas de viabilidades técnicas mais aprofundadas.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA – AGEITEC. **Cana-de-açúcar**. 2014. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-deacucar/arvore/CONTAG01_108_22122006154841.html>. Acesso em: 25 mar. 2014.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Capacidade de geração do Brasil**. 2016a. (Banco de Informações de Geração). Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 04 jan. 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Matriz energética brasileira**. 2016b. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 18 jan. 2017.
- ARAÚJO, B. C. **Simulação de uma usina sucroalcooleira utilizando uma ferramenta na plataforma Matlab**. 2014. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- BATISTA, F. **Usinas do Brasil correm para colher benefícios da alta do açúcar**. 2016. Disponível em: <<https://www.bloomberg.com.br/blog/usinas-brasil-correm-para-colher-beneficio-da-alta-acucar/>>. Acesso em: 05 jan. 2017.
- BLAY JR., C. **Biogás, a energia da vez**. 2014. Disponível em: <<http://agetec.com.br/news/43/114/Biogas-a-energia-da-vez/>>. Acesso em: 10 out. 2014.
- BUCK, R. Heliostat field layout improvement by nonrestricted refinement. **Journal of Solar Energy Engineering**, New York, v. 136, n. 2, art. 021014, 2013.
- BUCK, R. Heliostat field layout using non-restricted optimization. In: SOLARPACES, 18., 2012, Morocco. **Proceedings...** Morocco: 2012. p. 11-24.
- BURIN, K. B. Boosting power output of a sugarcane bagasse cogeneration plant using parabolic trough collectors in a feedwater heating scheme. **Applied Energy**, Kidlington, v. 154, p. 232-241, 2015.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Energia solar**. 2014. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-solar>>. Acesso em: 15 out. 2015.
- BRESSAN FILHO, A. **A geração termoeletrica com a queima do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil**: análise do desempenho da safra 2009-2010. Brasília: Conab, 2011. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_05_05_15_45_40_geracao_termo_baixa_res..pdf>. Acesso em: 28 jun. 2016

CASTRO, G. M. Valor de energia heliotérmica no âmbito do Sistema Interligado Nacional. **Energia heliotérmica**. 2015. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/especialistas/brasil-energia-eletrica-pesquisa/valor-da-energia-heliotermica-no-ambito-do-sistema-interligado-nacional>>. Acesso em: 12 jul. 2016.

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

CORGOZINHO, A. A. et. al. Simulação de plantas heliotérmicas utilizando TRNSYS. **Energia heliotérmica**. 2014. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/especialistas/brasil-energia-eletrica-pesquisa/simulacao-de-planta-heliotermica-utilizando-trnsys>>. Acesso em: 12 jul. 2016.

CSP PLAZA. Global CSP installed capacity increased to 4940 MW by the end of 2015. **CSP Plaza**, 2016. Disponível em: <<http://en.cspplaza.com/global-csp-installed-capacity-increased-to-4940-mw-by-the-end-of-2015.html>>. Acesso em: 16 jan. 2016.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR SINNENERGIE - GERMAN SOLAR ENERGY SOCIETY. **Planning and installing solar thermal systems**: a guide for installers, architects, and engineers. Berlin, 2005.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano decenal de expansão de energia 2021**. Brasília: EPE, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Nacional de Energia**. Brasília: EPE, 2008.

FREITAS, G.; BATISTA, F. Falta de investimento limita produção de açúcar no Brasil. **novaCana.com**, 2016. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/acucar/mercado/falta-investimento-limita-producao-acucar-brasil-210616/>>. Acesso em: 28 jun. 2016.

GONSALES NETO, R.; CARRER, C. C.; OLIVEIRA, C. E. L. Análise de custo do potencial de centrais de cogeração de energia distribuída para sistema de armazenamento de energia térmica associado ao uso na indústria animal. In: SIMPÓSIO DE GESTÃO E INOVAÇÃO NA INDÚSTRIA ANIMAL, 1., 2014, Pirassununga. **Anais...** Pirassununga: FZEA-USP, 2014. 7 p. 1 CD-ROM.

GUIMARÃES, A. P., RIBEIRO, C., BASTOS, L., et al. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Grupo de Trabalho de Energia Solar. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em 18 mai. 2016.

HUSSAIN, C.; NORTON, B.; DUFFY, A. Technological assessment of different solar-biomass systems for hybrid power generation in Europe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 68, p.1115-1129, 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL – INEAM. **Como a radiação solar é transformada em energia elétrica?** Disponível em <<http://ineam.com.br/como-a-radiacao-solar-e-transformada-em-energia-eletrica/>> Acesso em 17 ago. 2016.

KOLB, G. J. et al. **Heliostat cost reduction study**. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, 2007.

LI, L. et al. Optics of solar central receiver systems: a review. **Optics Express**, Washington, v. 24, n. 14, p. A985-A1007, 2016.

MAAG, G.; OLIVEIRA, K. T.; OLIVEIRA, C. E. L. Hybrid solar tower pilot plants for co-generation of heat and power for Brazilian agro-industry. In: ISES SOLAR WORLD CONGRESS, 2015, Daegu, Korea. **Proceedings...** Daegu, Korea, 2015. 1 CD-ROM.

MAAG, G. et al. Desempenho de plantas solares híbridas de torre para cogeração de eletricidade e calor na agroindústria brasileira. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENERGIA SOLAR, 6., 2016, Belo Horizonte. **Proceedings...** Belo Horizonte, 2016. 1 CD-ROM.

MILANI, R. F. A. T. **Hibridização de energia heliotérmica com gaseificação de bagaço para geração de energia elétrica**. 2016. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/rmilani.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2016.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY - NREL. **Renewable energy databook**. US Department of Energy, 2013.

NIXON, J.; DEY, P.; DAVIES, P. The feasibility of hybrid solar-biomass power plants in India. **Energy**, London, v. 46, n. 1, p. 541-554, 2012.

OLIVEIRA, C. A. **Cogeração a partir do bagaço de cana-de-açúcar: histórico, situação atual e perspectivas para o setor**. 2013. 64 f. Monografia (Especialização) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, Sertãozinho, 2013. Disponível em: <<http://www.etanol.ufscar.br/trabalhos-mta/sertaozinho-iii-c/trabalhos/cogerao-a-partir-do-bagaco-da-cana-de-acucar-historico-situacao-atual-e-perspectivas-para-o-setor>>. Acesso em: 29 jun. 2016.

PETERSEIM, J. et al. Solar tower-biomass hybrid plants: maximizing plant performance. **Energy Procedia**, Amsterdam, v. 49, p.1197-1206, 2014.

PETERSEIM, J. et al. Concentrated solar power hybrid plants, which technologies are best suited for hybridisation? **Renewable Energy**, Schenectady, v. 57, p. 520-532, 2013a.

PETERSEIM J. H. et al. Integrated solar combined cycle plants using solar towers with thermal storage to increase plant performance. In: ASME POWER CONFERENCE, 2013, Boston. **Proceedings...** Boston, 2013b. res. POWER2013-98121. 6 p.

PETROBRÁS. **Dados técnicos de biomassas**. Rio de Janeiro: Petrobrás - Depto. Industrial - Divisão de Fontes Energéticas Alternativas, 1982. 65 p.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (Org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2004. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em: 15 out. 2015.

PORTAL BRASIL. **Safrade cana 2016 e 2017 cresce em produção e área**. 2015. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2016/04/safrade-cana-2016-17-cresce-em-producao-e-area>>. Acesso em: 16 ago. 2017.

PORTAL ENERGIA HELIOTÉRMICA. **Existem projetos heliotérmicos no Brasil?** Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/fatos/existem-projetos-heliotermicos-no-brasil>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

PORTAL ENERGIA SOLAR. **Alta temperature energia solar térmica**. Disponível em: <<http://pt.solar-energia.net/solar-termica/temperatura-alta>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

RODRIGUES, M. F. B.; SIQUEIRA, M. B. B. A case study of and hybrid solar: sugarcane biomass power plant. In: ABCM INTERNATIONAL CONGRESS MECHANICAL ENGINEERING, 23., 2015, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro, 2015. 1 CD-ROM.

SILVA, M. B. da; MORAIS, A. S. Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28, 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Abepro, 2008. p. 1-9.

SOLARGIS. **Average annual sum, period 1999-2013**. Disponível em: <<http://solargis.info/imaps/#tl=Google:hybrid&bm=satellite&loc=-14.235004,-51.92528&c=-14.235004,-51.92528&z=15>>. Acesso em: 12 nov. 2015.

SORIA, R. et al. 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, Nov. 2015.

SOUZA, Z. J.; AZEVEDO, P. F. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas. **Revista da Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 44, n. 2, p. 179-199, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-20032006000200002&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 28 jun. 2016.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - ÚNICA. **Ranking de produção de cana, açúcar e álcool: região centro-sul: safra 2007/2008**. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.portalunica.com.br/files/estatisticas/>>. Acesso em: 02 maio 2016.

VENTURA FILHO, A. Energia elétrica no Brasil: contexto atual e perspectivas. **Interesse Nacional**, São Paulo, v. 6, n. 21, 2013. Disponível em:

<<http://interessenacional.uol.com.br/index.php/edicoes-revista/energia-eletrica-no-brasil-contexto-atual-e-perspectivas/>>. Acesso em: 20 out. 2015.

APÊNDICE

APÊNDICE A - Telas de simulações em SAM

→ Locação da planta

Download a weather file from the NREL NSRDB

Click Download and type a street address or latitude and longitude to download a weather file from the NREL NSRDB for United States and some international locations. SAM adds the downloaded file to the solar resource library so it will appear in the list below.

[NSRDB Map](#)

Choose a weather file from the solar resource library

Click a name in the list to choose a file from the library. Type a few letters of the name in the search box to filter the list. If your location is not in the library, try downloading a file (see above).

Search for: Name

Name	Station ID	Latitude	Longitude	Time zone	Elevation
Belize BLZ Belize Intl Airport (INTL)	785830	17.53	-88.3	-6	5
Bosnia and Herzegovina BIH Banja Luka (INTL)	132420	44.78	17.22	1	156
Botucatu SP TMY3 v.1	6249	-22.886	-48.445	-3	840
Brasil Botucatu T1	xxxx	-22.886	-48.445	-3	840
Brasil Botucatu- SP TMY3 v.Final	xxxx	-22.886	-48.445	-3	840
Brasil Botucatu SD (RTI)	777387	-22.886	-48.445	-3	840

City: Botucatu Time zone: GMT -3 Latitude: -22.886 °N

State: SP Elevation: 840 m Longitude: -48.445 °E

Country: Data Source: Station ID: xxxx

Data file: C:\SAM\2016.3.14\solar_resource\Brasil Botucatu- SP TMY3 v.Final.csv

Tools

Annual Weather Data Summary

Global horizontal 0.00 kWh/m²/day Average temperature 19.5 °C

Direct normal (beam) 5.47 kWh/m²/day Average wind speed 2.4 m/s

Diffuse horizontal 0.00 kWh/m²/day

[Visit SAM weather data website](#)

→ Dimensionamento de torre e receptor

Direct Steam Receiver

Receiver diameter 3.10226 m

Receiver height 6.34304 m

Number of groups of two panels 6

Number of panels 12

Coating Emittance 0.88

Coating Absorptance 0.94

Boiler

Boiler height 2.80417 m

Maximum boiler flux 800 kWt/m²

Outside diameter of boiler tubes 0.0254 m

Thickness of boiler tubes 0.002159 m

Boiler tube material Stainless AISI316

Target boiler output steam quality 0.5

Boiler heat loss (estimated) 96 kW/m²

Superheater

Superheater height 2.24175 m

Maximum superheater flux 500 kWt/m²

Outside diameter of superheater tubes 0.01905 m

Thickness of superheater tubes 0.001651 m

Superheater material Stainless AISI316

Superheater outlet temperature set point 550 °C

Superheater heat loss (estimated) 80 kW/m²

Reheater

Reheater height 1.29713 m

Maximum reheater flux 350 kWt/m²

Outside diameter of reheater tubes 0.0381 m

Thickness of reheater tubes 0.002159 m

Flow

Flow Pattern 2

Tower

Tower height 51.8881 m

Thermal Design & Operation

Solar multiple 0.5

Design-point DNI 950 W/m²

Min fraction of design thermal power 0.25

Receiver design thermal power 45 MWt

Receiver startup delay time 0.2 hr

Receiver startup delay energy fraction 0.25

Heat loss factor 1

Flux Calculation Settings

Receiver flux map resolution 12

No. days in flux map lookup 8

Hourly frequency in flux map lookup 2

→ Dimensionamento dos componentes

Plant Design		Operation	
Design turbine gross output	36 MWe	Low resource standby period	2 hr
Estimated gross to net conversion factor	0.87	Fraction of thermal power needed for standby	0.2
Net nameplate capacity	31.32 MWe	Startup time	0.5 hr
Rated cycle efficiency	0.4	Fraction of thermal power needed for startup	0.5
Design thermal input power	90 MWt	Minimum operation fraction	0.25
High pressure turbine inlet pressure	160 bar	Max over design operation fraction	1.05
High pressure turbine outlet pressure	40 bar	Fossil dispatch mode	Supplemental operation
Design reheat mass flow rate fraction	0.85		
Fossil backup boiler LHV efficiency	0.9		
Steam cycle blowdown fraction	0.02		

Plant Cooling Mode	
Condenser type	Air-cooled
Ambient temp at design	42 °C
Reference condenser water dT	10 °C
Approach temperature	5 °C
ITD at design point	16 °C
Condenser pressure ratio	1.0028
Minimum condenser pressure	2 inHg
Cooling system part load levels	8

Availability and Curtailment	
Curtailment and availability factors are annual or hourly factors that modify system output to represent system outages or other events.	
Edit losses...	Constant loss: 4.0 % Hourly losses: None Custom periods: None

→ Cálculo dos períodos de despacho

Dispatch Control		
	Hybrid Cooling	Fossil fill fraction
Period 1:	0	0.65
Period 2:	0	0
Period 3:	0	1
Period 4:	0	1
Period 5:	0	0
Period 6:	0	0
Period 7:	0	0
Period 8:	0	0
Period 9:	0	0

Fossil fill fractions apply to the design turbine thermal input.

Use the weekday and schedule matrices to specify the month and hour of day for each of the nine periods.

Copy schedule from TOD Factors page

Weekday Schedule	
	12am 1am 2am 3am 4am 5am 6am 7am 8am 9am 10am 11am 12pm 1pm 2pm 3pm 4pm 5pm 6pm 7pm 8pm 9pm 10pm 11pm
Jan	4 4 4 4 4 4 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 4 4 4 4 4
Feb	4 4 4 4 4 4 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 4 4 4 4 4
Mar	4 4 4 4 4 4 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 4 4 4 4 4
Apr	3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3
May	3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3
Jun	3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3
Jul	3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3
Aug	3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3
Sep	3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3
Oct	3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3
Nov	3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3
Dec	4 4 4 4 4 4 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 4 4 4 4 4

Weekend Schedule	
	12am 1am 2am 3am 4am 5am 6am 7am 8am 9am 10am 11am 12pm 1pm 2pm 3pm 4pm 5pm 6pm 7pm 8pm 9pm 10pm 11pm
Jan	4 4 4 4 4 4 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 4 4 4 4 4
Feb	4 4 4 4 4 4 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 4 4 4 4 4
Mar	4 4 4 4 4 4 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 4 4 4 4 4
Apr	3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3
May	3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3
Jun	3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3
Jul	3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3
Aug	3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3
Sep	3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3
Oct	3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3
Nov	3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3
Dec	4 4 4 4 4 4 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 4 4 4 4 4

→ Cálculo do consumo de energia

Parasitic Energy Consumption				
Startup energy of a single heliostat	0.025	kWe-hr		
Tracking power for a single heliostat	0.055	kWe		
Feedwater to boiler pump efficiency	0.85			
Fraction of rated gross power consumed at all times	0.0055	MWe/MWt		
Piping loss coefficient	10200	Wt/m		
Piping length constant	0	m		
Piping length multiplier	2.6			
Total piping length	134.909	m		

	Factor	Coeff 0	Coeff 1	Coeff 2					
Balance of plant parasitic	0	MWe/MWcap	1	0	0.483	0	BOP	0	MWe
Aux heater, boiler parasitic	0.023	MWe/MWcap	1	0.483	0.571	0	Aux	0.872712	MWe

→ Análise preliminar de custo

Direct Capital Costs				
-Heliostat Field				
Reflective area	42,302	m ²	Site improvement cost	0.00 \$/m ² \$ 0.00
			Heliostat field cost	100.00 \$/m ²
			Heliostat field cost fixed	0.00 \$ \$ 4,230,181.50
-Tower				
Tower height	51.8881	m		
Receiver height	6.34304	m	Tower cost fixed	3,000,000.00 \$
Heliostat height	12.2	m	Tower cost scaling exponent	0.0113 \$ 5,573,594.00
-Receiver				
Receiver area	61,8195	m ²	Receiver reference cost	55,402,800.00 \$
			Receiver reference area	1110 m ²
			Receiver cost scaling exponent	0.7 \$ 7,338,270.00
-Thermal Energy Storage				
Storage capacity	0	MWht	Thermal energy storage cost	0.00 \$/kWht \$ 0.00
-Power Cycle				
Cycle gross capacity	36	MWe	Fossil backup cost	0.00 \$/kWe \$ 0.00
			Balance of plant cost	0.00 \$/kWe \$ 0.00
			Power cycle cost	11.00 \$/kWe \$ 396,000.00
			Subtotal	\$ 17,538,046.00
-Contingency				
			Contingency cost	7 % of subtotal \$ 1,227,663.13
			Total direct cost	\$ 18,765,708.00
Indirect Capital Costs				
Total land area	95	acres	Cycle net (nameplate) capacity	31 MWe
		\$/acre	% of direct cost	\$/We \$
EPC and owner cost	0.00		11	0.00 0.00 \$ 2,064,228.00