

# ANÁLISE TÉCNICA DE UMA PLANTA HÍBRIDA CSP DE TORRE CENTRAL COM TURBINA A GÁS

**Fernando Kosminsky** – fernando.kosminsky@hotmail.com

Universidade de Pernambuco - UPE

**Alcides Codeceira Neto** – acodeceiraneto@gmail.com

Universidade de Pernambuco – UPE,

Chesf

**José Bione de Melo Filho** – jbionef@chesf.gov.br

Universidade de Pernambuco – UPE,

Chesf

**Resumo.** A radiação solar viaja pelo espaço até atingir a atmosfera terrestre. Neste momento sua intensidade é de aproximadamente  $1366 \text{ W/m}^2$  em um plano perpendicular à direção de propagação (Augsburger, 2013). Ao penetrar na atmosfera parte dessa energia atinge a superfície do planeta sem sofrer absorção ou difusão. Essa componente chamada de Irradiação Direta Normal (DNI) é a única parcela da energia solar capaz de ser aproveitada em plantas que concentram a irradiação em sistemas conhecidos como Concentrating Solar Power (CSP). Além de ser uma energia limpa, gratuita e renovável seu uso pode trazer benefícios econômicos, ambientais e sociais. Este artigo técnico tem como objetivo quantificar a redução do consumo de combustível e emissão de  $\text{CO}_2$  na atmosfera em uma planta híbrida de 20MW no município de Bom Jesus da Lapa que gera eletricidade com uso de turbina a gás, em função do campo solar CSP no modelo de torre central. Para isso foi desenvolvido um algoritmo de modelagem da turbina a gás e receptor central em conjunto com dados solarimétricos obtidos por satélite para a região de estudo e um software livre que simula a contribuição térmica do campo solar.

**Palavras-chave:** Irradiação Direta Normal (DNI), Concentrating Solar Power (CSP).

## 1. INTRODUÇÃO

A mudança climática é um dos desafios globais deste século e é sabido que o consumo de energia é o maior responsável por esse problema ambiental. Somado a isso existe uma grande preocupação com segurança energética devido ao uso de fontes não renováveis de energia como os combustíveis fósseis (Okoroigwe e Madhlopa, 2016). Por ser ilimitada, limpa e segura a energia solar é vista como uma das mais promissoras para substituir ou reduzir o consumo de combustíveis fósseis (Toro et al, 2016). Neste sentido o uso de energia solar para geração de eletricidade é visto como uma alternativa viável para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e aumentar a segurança energética global (Okoroigwe e Madhlopa, 2016). Uma das formas de converter energia solar em energia elétrica é através da tecnologia Concentrating Solar Power (CSP). Esse sistema converte a irradiação solar direta (DNI) em energia térmica para posteriormente ser convertida em energia elétrica (Lovegrove e Stein, 2012).

Neste projeto será apresentado um estudo sobre a viabilidade técnica e impacto ambiental da tecnologia Concentrating Solar Power (CSP) de Torre Central para redução do consumo de gás natural em uma turbina em ciclo Brayton aberto para geração de 20 MW energia elétrica em Bom Jesus da Lapa. Os dados solarimétricos utilizados no trabalho foram os disponibilizados por satélites para a região de estudo. O modelo de geração híbrido utilizará energia solar e combustão de gás natural para fornecer ao fluido de trabalho energia suficiente para alcançar a temperatura de entrada da turbina. Para estimar o campo solar (quantidade de heliostatos e sua disposição no entorno da torre central bem como a altura da mesma) e a potência térmica fornecida por ele foi utilizado o software System Advisor Model (SAM). Para estudar o bloco de potência foi feita uma modelagem na linguagem MATrix LABoratory (MATLAB).

## 2. PLANTA CSP DE TORRE CENTRAL

Um sistema CSP de Torre Central consiste em um arranjo de espelhos (heliostatos) com mobilidade para acompanhar o movimento do sol que são posicionados de forma espaçada em um terreno (campo solar) com a função de refletir a irradiação solar direta incidente para um receptor no alto de uma torre central. Os heliostatos devem ser posicionados de forma espaçada para que não haja interferência mecânica ou óptica entre eles (Augsburger, 2013). A Fig. 1 mostra duas plantas CSP de torre central.

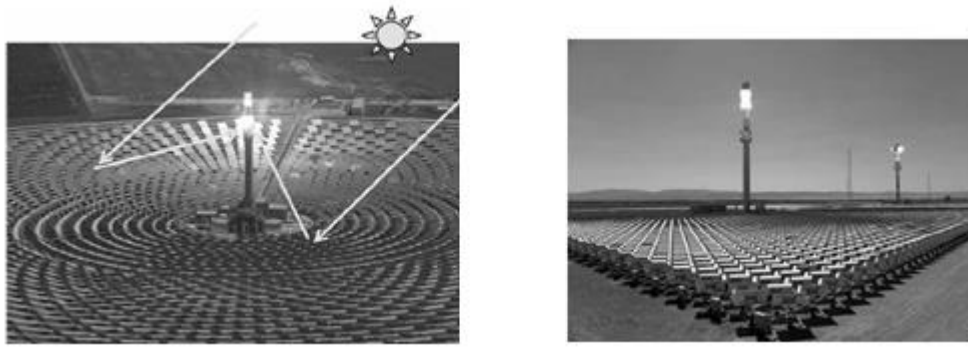


Figura 1 - Planta Gemasolar (Espanha) a esquerda e eSolar (EUA) a direita (Lovegrove e Stein, 2013).

O receptor é desenvolvido para interceptar de forma eficiente a luz solar incidente (energia solar) e absorvê-la na forma de calor com a consequente elevação de sua temperatura. Essa energia é coletada por um fluido e usada para geração de eletricidade, armazenamento térmico ou processos que fazem uso de energia térmica (Augsburger, 2013). Como a energia solar é concentrada em um único ponto não há necessidade de gastos com grandes redes de transmissão da energia térmica como ocorre em outros processos como calha parabólica. A maioria das plantas CSP de torre central são grandes usinas que foram construídas com uso de turbina a vapor convencional no bloco de potência, no entanto muita pesquisa vem sendo feita com o objetivo de desenvolver projetos menores e com diferentes formas de uso da energia térmica (Lovegrove e Stein, 2013). A forma como a energia solar concentrada em torre central é convertida em energia elétrica utiliza o mesmo princípio básico nos diversos modelos de tecnologia a depender do fluido de trabalho utilizado. Os principais fluidos são o sal fundido, o ar atmosférico (comprimido) e ciclos a vapor direto (Augsburger, 2013).

A viabilidade do conceito de planta híbrida com uso de energia solar e combustível fóssil foi comprovada entre outros experimentos, pelo projeto SOLGATE que mostrou ser possível adaptar uma turbina a gás para operar em uma planta mista. Os testes em diferentes temperaturas mostraram que o projeto é capaz de gerar energia elétrica com custo variável a depender da contribuição do campo solar. Esse modelo de planta utiliza o ar como fluido trocador de calor e de trabalho e sua temperatura de saída no receptor central chegou a 960°C (Lovegrove e Stein, 2013). No projeto SOLGATE a turbina a gás foi adaptada a partir do modelo de um motor de helicóptero e instalada na torre central de testes da plataforma solar de Almeria, na Espanha (SOLGATE, 2005).

### 3. PROJETO

A tecnologia CSP possui como uma de suas maiores desvantagens o fato da sua fonte de energia ser intermitente. A irradiação direta normal (DNI) não está disponível em horário noturno e em dias nublados que impedem que a energia solar incida com potência suficiente para aquecer o fluido no receptor central. Contudo, o campo solar pode fornecer grande quantidade de energia térmica em regiões com altos índices de DNI como no semiárido nordestino.

Visando a redução do consumo de combustível no bloco de potência, estabilidade e segurança no controle e fornecimento de energia e redução da emissão de gases causadores do efeito estufa e poluentes na atmosfera, o sistema híbrido, objeto de estudo neste trabalho, combina as vantagens da tecnologia CSP de Torre Central com a estabilidade e segurança energética de um bloco de potência com turbina a gás que utiliza gás natural como combustível para geração de eletricidade.

A Fig. 2 ilustra uma planta híbrida que opera em ciclo Brayton aberto para geração de energia elétrica. Nesse sistema o fluido de trabalho é o próprio ar atmosférico que será comprimido, aquecido e expandido. Após passar pelo compressor o fluido é direcionado para o receptor central. Durante o dia o campo solar irá aquecer o ar comprimido de forma que menos combustível seja consumido na câmara de combustão para atingir a temperatura de entrada da turbina na saída do combustor. Esse sistema permite um controle da geração de energia em momentos de baixa, média e alta demanda. Também é possível a continuidade da operação do sistema em horários noturnos e em dias nublados. Como a temperatura do ar na saída do receptor central varia bastante ao longo do dia e muitas vezes de forma abrupta é importante um sistema de controle que permita uma resposta rápida por parte da câmara de combustão para que a temperatura de entrada da turbina seja respeitada.

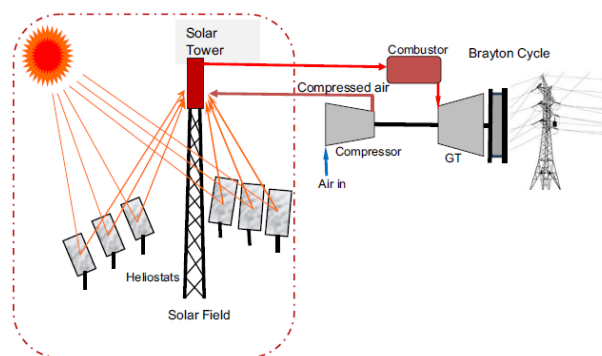


Figura 2: Sistema Híbrido CSP (Okoroigwe e Madhlopa, 2016).

O uso de turbina a gás permite que a planta seja instalada em qualquer região do país independente da disponibilidade de água (que seria necessária no condensador caso a opção fosse por um ciclo com turbina a vapor). Ao aquecer ar pressurizado no receptor central, a energia solar pode ser encaminhada diretamente para a turbina a gás sem as perdas que ocorreriam na presença de um trocador de calor intermediário. Além disso, turbinas a gás não necessitam do uso de água para resfriamento, o que permite que o projeto em estudo seja viável em regiões que não disponham de recursos hídricos. Esse modelo de planta pode ser acionado e operar em condições nominais em 30 minutos, um intervalo de tempo muito menor que as plantas semelhantes que utilizam bloco de potência com turbinas a vapor. A turbina a gás em particular pode ser acionada e trabalhar em carga total em ainda menos tempo, cerca de 10 minutos. Esse período transitente reduzido, em comparação com tecnologias a vapor torna o uso de turbinas a gás mais atrativo para o bloco de potência (Energia Heliotérmica, 2017).

Neste trabalho foi feito um estudo teórico da viabilidade técnica de uma planta de 20 MW útil em Bom Jesus da Lapa cujo bloco de potência utiliza turbina a gás. A simulação do bloco de potência da planta CSP de Torre Central foi feita em MATLAB. O algoritmo mensura a geração de energia elétrica e o consumo de combustível além da emissão total de  $\text{CO}_2$  na atmosfera. Com auxílio do SAM o comportamento do campo solar e sua contribuição térmica complementam a modelagem da planta utilizando os dados da biblioteca do software que foram coletados por satélite e processados por algoritmos que reproduzem com boa precisão as características solares na superfície do local onde a planta em estudo poderia ser instalada em Bom Jesus da Lapa. Esse software oferece uma análise completa para projeto CSP de torre central apenas com uso de sal fundido ou vapor direto.

No estudo apresentado neste artigo foi utilizado uma turbina a gás onde o ar é o fluido trocador de calor e de trabalho. Por esse motivo apenas os dados relativos ao campo de heliostatos e a potência térmica incidente no receptor central foram considerados. Os heliostatos possuem altura e largura de 12,2 metros ( $148,84 \text{ m}^2$ ) para todos os campos solares estudados e são distribuídos ao redor da torre central. O limite superior da temperatura de saída do ar no receptor central volumétrico, que faz uso de material cerâmico em sua estrutura porosa, foi fixado em 1250K e sua eficiência média de operação é 75%. Esses valores foram adotados por serem conservadores e estarem alinhados com o desempenho esperado de receptores otimizados produzidos em escala comercial, como é o caso do estudo feito com o protótipo desenvolvido e testado no instituto Paul Scherrer (Pozivila et al, 2016). O campo solar é responsável por fornecer até 27% da potência nominal útil gerada pela planta.

#### 4. MODELAGEM

O algoritmo é composto por quatro etapas as quais são a do compressor, do receptor central, da câmara de combustão e da turbina a gás. Integradas em série elas simulam o comportamento da planta ao longo de um mês. Os dados do campo solar são fornecidos pelo SAM em planilha eletrônica com informações horárias da potência térmica incidente no receptor central.

##### 4.1 Compressor

O algoritmo do compressor solicita do usuário as informações referentes ao fluxo mássico de ar, a razão de compressão, eficiência isentrópica do compressor (85%) e a temperatura de entrada do ar que é a temperatura ambiente. A vazão mássica foi fixada em  $80 \text{ Kg/s}$  por ser o fluxo necessário para a turbina gerar 50MW dos quais 30MW são consumidos pelo compressor e 20MW são disponibilizados como energia útil. A pressão de saída do compressor foi fixada em  $1,3 \text{ MPa}$  para atender a necessidade de pressão de entrada da turbina. Em seguida partindo de valores iniciais para o calor específico à pressão constante do ar e a constante universal dos gases é calculado o coeficiente de Poisson. De posse desse valor é calculada a temperatura de saída do ar no compressor e a média entre a temperatura de entrada e a de saída. Em seguida um novo valor de calor específico à pressão constante é calculado em função da temperatura média mencionada anteriormente. Esse valor atualizado de calor específico permite calcular um novo coeficiente de Poisson, uma temperatura de saída nova e uma temperatura média nova, sempre mantendo constante a temperatura de

entrada do ar no compressor. Caso a diferença entre as médias das temperaturas seja menor que o erro considerado admissível o algoritmo passa para a etapa seguinte. Caso contrário o último valor da temperatura de saída passa a assumir a posição do valor anteriormente calculado da temperatura de saída e o processo se repete até que seja encontrado o calor específico à pressão constante que melhor represente o comportamento do ar no compressor, uma vez que na prática o calor específico à pressão constante é fortemente dependente da temperatura e varia ao longo do processo. Ao fim do ciclo é possível mensurar a potência do compressor com precisão (Fig. 3).

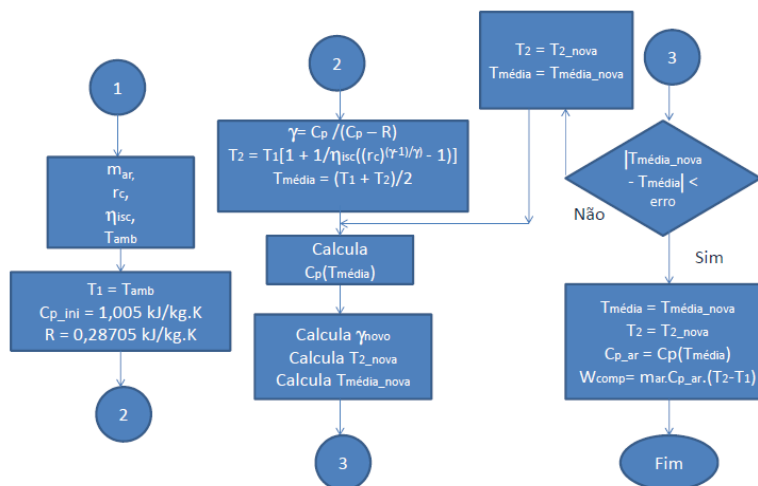


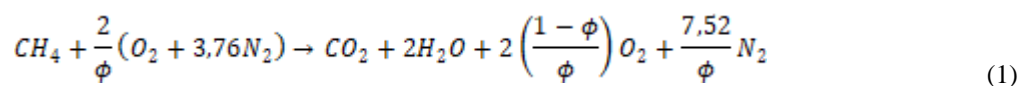
Figura 3 – Diagrama de modelagem do compressor.

## 4.2 Receptor

Na etapa do receptor central o SAM fornece a potência térmica incidente em intervalo horário do campo solar no alto da torre e é definido pelo usuário a eficiência do receptor. Inicialmente é feita a simulação do campo solar para posteriormente utilizar os resultados no algoritmo do receptor. O SAM solicita do usuário como um dos principais dados de entrada a potência térmica incidente no receptor central no ponto de operação nominal ao meio dia do solstício de verão (21 de dezembro) para em seguida estimar o número de heliostatos necessários, a disposição dos mesmos, a área do campo solar e a altura da torre central. Após a simulação do campo solar os dados são exportados para uma planilha eletrônica que alimenta o algoritmo com os dados da potencia térmica incidente no receptor. Cada campo solar simulado neste trabalho foi resultado do aumento gradual da potência térmica incidente no receptor central no seu ponto nominal de operação ao meio dia de 21 de dezembro. De acordo com a eficiência do receptor é possível determinar a temperatura de saída do fluxo mássico de ar nessa etapa. A temperatura de saída do compressor (661,6K calculada na etapa anterior) é utilizada como a de entrada no receptor e neste trabalho foi definida uma eficiência média de 75% para o receptor. Um processo semelhante ao do compressor é realizado para se estimar o valor que melhor representa o calor específico à pressão constante do ar ao longo desse volume de controle. A temperatura limite de saída do ar no receptor foi fixada em 1250K devido as limitações do material cerâmico do qual é constituído o receptor volumétrico. Na prática quando o receptor alcança sua temperatura máxima de operação os heliostatos são gradualmente “desativados” para respeitar essa limitação. Nos momentos em que a irradiação solar direta incidente no receptor supera o limite de operação do mesmo o algoritmo impõe a temperatura máxima de saída do ar em 1250K. Esse controle simula a “desativação” dos espelhos nos momentos de pico de DNI. A temperatura de saída do ar no receptor varia muito ao longo do dia a depender das condições meteorológicas (nuvens que impedem a passagem da irradiação direta normal) e das estações do ano. Mesmo durante o verão a ocorrência de nuvens pode anular totalmente a incidência de DNI no campo solar o que irá refletir na redução da temperatura do ar na saída do receptor (Fig. 4).

## 4.3 Câmara de combustão

Nessa etapa o usuário fornece a eficiência da câmara (foi adotado o valor de 100%), a temperatura de entrada da turbina (1300K) e o poder calorífico inferior do combustível (49.000 KJ/Kg). A reação da combustão do metano com o ar seco na base mássica é utilizada para mensurar os gases de exaustão, conforme mostrado nas equações 1 e 2.



$$\phi = \frac{\text{massa molar do ar (estequiométrico)}}{\text{massa molar do ar}} \quad (2)$$

A temperatura de entrada do ar no combustor varia de acordo com a influência do campo solar na etapa do receptor. A razão combustível ar é calculada considerando inicialmente que o produto da combustão na saída é composto apenas pelo ar que entra. Com a razão determinada é possível estimar um valor inicial para a massa molar de ar que por sua vez permite fazer um balanceamento da equação de combustão do metano na base mássica. Dessa forma é calculado um percentual mássico teórico inicial de cada componente do gás na saída do combustor e uma equação do calor específico à pressão constante medido como a média ponderada (de acordo com o percentual mássico) dos componentes do gás em função da temperatura é determinada. Em seguida uma nova razão de combustível ar é calculada, dessa vez utilizando também a equação do calor específico à pressão constante do gás formado na saída do combustor. Se a diferença entre as duas razões for menor que o erro aceitável o processo é encerrado. Caso contrário o algoritmo substitui o valor anterior da razão de combustível ar pelo novo e recomeça o processo. A partir de então passa a ser considerando que o gás na saída dessa etapa é o produto da combustão e não mais apenas o ar que entra. Como dados de saída neste bloco do algoritmo temos o consumo horário de combustível, o percentual mássico dos componentes do gás de exaustão e sua equação do calor específico à pressão constante em função da temperatura (Fig. 5).

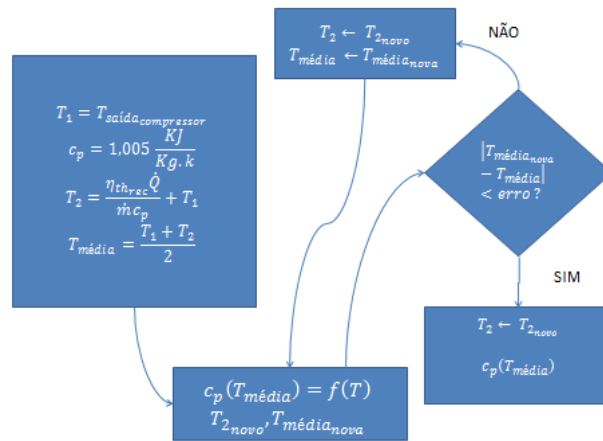


Figura 4 – Diagrama de modelagem do receptor.

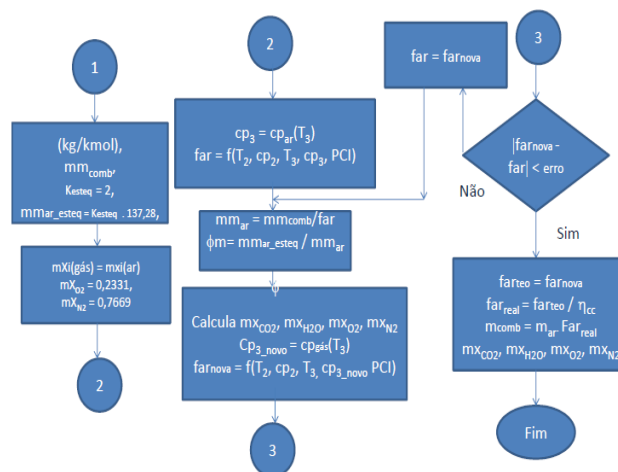


Figura 5 – Diagrama de modelagem da câmara de combustão.

#### 4.4 Turbina

O usuário determina a pressão de entrada e saída da turbina (1,209MPa e 105KPa respectivamente) e sua eficiência isentrópica (90%). A massa molar do gás de exaustão calculada na etapa anterior é utilizada para determinação da constante R do gás (razão entre a constante universal dos gases e a massa molar do gás em estudo) permitindo determinar o coeficiente de Poisson desse gás. Em seguida é calculada a temperatura inicial do gás na saída da turbina e a temperatura média entre o valor de entrada e o de saída. Da mesma forma que no compressor e no receptor é calculado um novo valor de calor específico à pressão constante do gás de acordo com a temperatura média utilizando a equação encontrada na etapa anterior, um novo coeficiente de Poisson, uma nova temperatura de saída do gás na turbina e uma nova temperatura média. Se a diferença entre as temperaturas médias for menor que o erro aceitável o processo é encerrado, caso contrário a temperatura final nova substitui a anteriormente encontrada e o processo se repete até que ocorra a convergência do erro para um valor aceitável. Ao fim do ciclo é possível calcular com precisão a potência gerada na turbina (Fig. 6).

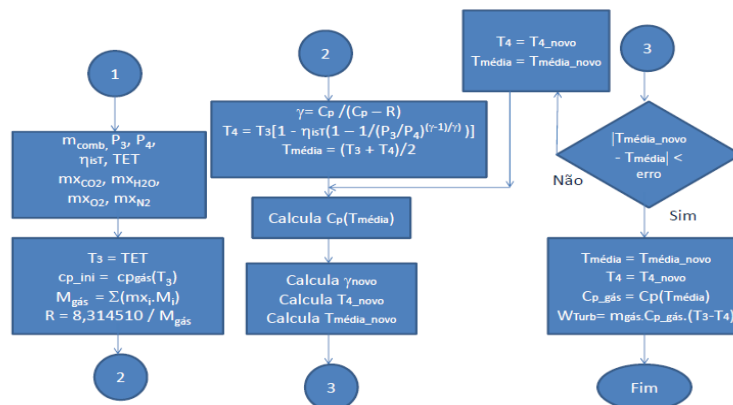


Figura 6 – Diagrama de modelagem da turbina.

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

### 5.1 Sem campo solar

Inicialmente foi feita uma simulação da planta sem o uso do campo solar. Os resultados podem ser vistos nas Tabs. 1 a 4.

Para um regime de operação ininterrupto ao longo de um ano (365 dias) de acordo com as características de operação conforme as tabelas acima e sem uso de energia solar há uma emissão total de 126.111.841,4 Kg de CO<sub>2</sub> na atmosfera e um consumo de 45.870.810,46 Kg de combustível gerando um total de 179.781.729,55 kWh de energia útil a uma taxa de 3,919305714 kWh/Kg de combustível. A ausência do campo solar faz com que o comportamento da planta seja constante ao longo do ano. A diferença nos resultados encontrados entre dois meses quaisquer está unicamente relacionada a variação no número de dias de cada mês.

Tabela 1 - Características de operação do compressor

<b>Compressor</b>	
Temperatura Ambiente (K)	298
Temperatura de saída do compressor (K)	661,6
Potência do compressor (kW)	30.099,96
Fluxo mássico de ar (kg.s <sup>-1</sup> )	80
Razão de compressão	13
Eficiência isentrópica (%)	85

Tabela 2– Características de operação da câmara de combustão

<b>Câmara de combustão</b>	
Temperatura de entrada do ar (K)	661,6
Temperatura de saída do ar (K)	1300
Eficiência (%)	100
Vazão mássica do combustível ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	1,454

Tabela 3 - Características de operação da turbina

<b>Turbina</b>	
Temperatura de entrada da turbina (K)	1300
Temperatura de saída da turbina (K)	784,62
Eficiência isentrópica (%)	90
Pressão de entrada da turbina (bar)	12,09
Pressão de saída da turbina (bar)	1,05
Potência gerada (kW)	50.622,59
Potência útil (kW)	20.533,03

Tabela 4 - Relatório de desempenho do projeto sem influência do campo solar

Mês	Número de dias	Consumo de combustível (Kg)	Emissão total de $\text{CO}_2$ (kg)	Energia útil gerada (kWh)	$\text{kWh/kg}_{\text{comb}}$
1	28	3.158.856,69	9.674.333,03	13.791.475,14	3,92
2	30	3.770.203,59	10.365.356,83	14.776.580,51	3,92
3	31	3.895.877,05	10.710.868,72	15.269.133,19	3,92
Total	365	45.870.810,46	126.111.841,40	179.781.729,60	3,92

Para um regime de operação ininterrupto ao longo de um ano (365 dias) de acordo com as características de operação conforme as tabelas acima e sem uso de energia solar há uma emissão total de 126.111.841,4 Kg de  $\text{CO}_2$  na atmosfera e um consumo de 45.870.810,46 Kg de combustível gerando um total de 179.781.729,55 kWh de energia útil a uma taxa de 3,919305714 kWh/Kg de combustível. A ausência do campo solar faz com que o comportamento da planta seja constante ao longo do ano. A diferença nos resultados encontrados entre dois meses quaisquer está unicamente relacionada a variação no número de dias de cada mês.

## 5.2 Com campo solar

As Tabs. 5, 6 e 7 mostram o resultado do comportamento da planta de acordo com o campo solar ao longo de um ano. A variação do número de heliostatos, o aumento de heliostatos e a variação da redução do consumo de combustível apresentados na Tab. 5 são relações entre o campo solar  $x$  e o campo solar  $x-1$ .

É possível observar que a utilização da energia solar no processo de geração de energia elétrica levou a uma redução de 27% do consumo de combustível com igual redução da emissão total de  $\text{CO}_2$  no caso da simulação do campo solar sete com o uso de 1291 heliostatos e uma torre central com 90,22 metros de altura. Em todos os casos foi limitado o valor de 1250K como a temperatura máxima de saída do ar no receptor central. Isso para simular a limitação do material do qual o receptor é constituído e por não exceder a temperatura de entrada da turbina a gás que foi fixada em 1300K. Em todos os momentos nos quais o campo solar fornece energia para aquecer o ar até a temperatura limite do receptor o eventual excedente energético gerado é desperdiçado através da “desativação” gradual de heliostatos com o objetivo de não danificar o receptor. O processo de desativação dos espelhos se inicia no momento em que a temperatura de saída do ar no receptor alcança 1250K através da imposição no algoritmo desse valor como limite de temperatura de saída do ar. Por esse motivo apesar do aumento no número de espelhos levar a uma redução no consumo de combustível é possível perceber que essa relação não é linear. Esse efeito pode ser observado nas simulações deste trabalho e serviu de parâmetro técnico para definição da escolha do melhor modelo de campo solar.

Tabela 5 - Relatório anual de desempenho do projeto de acordo com o campo solar [1]

Relatório Anual	Número de Heliostatos do campo solar	Variação do número de Heliostatos	Aumento de Heliostatos (%)	Redução Total do consumo de combustível (%)	Variação da redução do consumo de combustível (%)
Sem Campo Solar	0	0	0	0	0
Campo Solar 1	415	415	100	8,37	8,37
Campo Solar 2	564	149	35,9	12,07	3,7
Campo Solar 3	737	173	30,67	15,68	3,6
Campo Solar 4	904	167	22,65	19,38	3,7
Campo Solar 5	1023	119	13,16	23,22	3,83
Campo Solar 6	1149	126	12,31	25,52	2,3
Campo Solar 7	1291	142	12,35	27,05	1,53

Tabela 6 - Relatório anual de desempenho do projeto de acordo com o campo solar [2]

Relatório Anual	Número de heliostatos	kWh/Kg <sub>comb</sub>	Consumo de combustível (kg)	Energia Útil Gerada (kWh)	Potência Útil (MW)
Sem Campo Solar	0	3,92	45.870.810,46	179.781.730	20,52
Campo Solar 1	415	4,27	42.028.890,44	179.570.462	20,49
Campo Solar 2	564	4,44	40.331.353,54	179.472.934	20,48
Campo Solar 3	737	4,63	38.677.011,46	179.375.432	20,47
Campo Solar 4	904	4,84	36.977.980,17	179.272.842	20,46
Campo Solar 5	1023	5,08	35.218.918,74	179.164.521	20,45
Campo Solar 6	1149	5,24	34.163.710,98	179.099.121	20,44
Campo Solar 7	1291	5,35	33.461.223,17	179.055.592	20,44

Tabela 7- Relatório anual de desempenho do projeto de acordo com o campo solar [3]

Relatório Anual	Número de heliostatos	Emissão total de CO <sub>2</sub> (Kg)	Redução total da emissão de CO <sub>2</sub> (%)	Altura da torre central (m)	Área do campo solar (m <sup>2</sup> )
Sem Campo Solar	0	126.111.841,40	0,00	0	0
Campo Solar 1	415	115.562.201,30	8,36	64,46	242.816,4
Campo Solar 2	564	110.894.747,50	12,06	71,09	349.719,5
Campo Solar 3	737	106.346.651,40	15,67	71,05	522.542,7
Campo Solar 4	904	101.675.844,70	19,37	71,83	684.744,1
Campo Solar 5	1023	96.840.124,85	23,21	75,66	799.194,1
Campo Solar 6	1149	93.939.315,29	25,51	80,61	898.572,8
Campo Solar 7	1291	92.008.080,78	27,04	90,22	927.673,8

Dimensionar o campo solar é uma tarefa complexa que depende de aspectos técnicos e financeiros. Com a simulação proposta neste trabalho é possível observar que existe uma região entre o campo solar três e o campo solar cinco em que a redução do consumo total de combustível é mantida constante em aproximadamente 3,7% entre cada um deles. A partir do campo solar seis e principalmente no campo solar sete é visível a mitigação do efeito dos heliostatos adicionais no resultado final da economia de combustível. O aumento de 12,35% no número de heliostatos do campo solar sete em relação ao campo solar seis (142 unidades) levou a uma redução de apenas 1,531% no consumo de combustível entre os mesmos dois campos. Isso ocorre como uma consequência da necessidade de desativar grande parte dos espelhos com cada vez mais frequência nos horários em que o DNI alcança índices mais elevados.

Levando em consideração apenas os aspectos técnicos é recomendável que a planta em estudo para implantação em Bom Jesus da Lapa possua um campo solar composto por uma quantidade de heliostatos entre 737 e 1023, o que



resulta em uma economia de combustível entre 15,6% e 23,2%. Caso o objetivo seja apenas o desenvolvimento de uma planta piloto solar CSP é também válido o campo solar dois com 564 heliostatos ou menos. Nesse caso o objetivo de estudo do desempenho e aprimoramento da tecnologia bem como o seu comportamento seriam aspectos mais relevantes que a redução do consumo de combustível que ficaria limitada a 12% ou menos. A partir de 1023 heliostatos a economia do consumo de combustível passa a ser menos significativa e por esse motivo o campo solar cinco foi recomendado como o limite superior do projeto no que diz respeito a quantidade de espelhos. Uma possível alternativa para melhor aproveitamento dos campos solares com mais espelhos seria o aumento do fluxo mássico de ar no sistema uma vez que a temperatura de operação do receptor tende a diminuir com a elevação da vazão mássica do fluido trocador de calor. Com essa medida é possível manter um maior número de espelhos “ativos” nos horários de pico da irradiação solar a um custo de maior complexidade e recursos financeiros. Outras implementações possíveis seriam o acréscimo de receptores em alturas diferentes da torre ou mesmo a adição de uma ou mais torres. Dessa forma a intensidade da energia por receptor seria reduzida e consequentemente mais espelhos permaneceriam “ativos” em horários de pico solar.

## 6. CONCLUSÃO

Todas as características de operação do bloco de potência são mantidas constantes estando ou não a planta utilizando energia solar. Uma vez que o campo solar passa a contribuir com potência térmica para a geração de energia a temperatura de entrada do ar no combustor é elevada e com isso menos combustível é necessário para que o fluxo mássico alcance a temperatura de entrada da turbina. Como consequência uma leve redução de massa nos gases de exaustão do combustor é verificada e uma insignificante redução da potência útil gerada na turbina é observada.

A partir dos resultados apresentados por este estudo é possível perceber que o uso de energia solar concentrada pode trazer benefícios econômicos, ambientais e sociais. A redução do consumo de combustível fóssil oferece economia financeira e atenuação da emissão de gases poluentes e causadores do efeito estufa responsável pelo aquecimento global. Capacitação e desenvolvimento de capital humano é outro benefício da implantação de uma planta CSP no país. Políticas de incentivo fiscal ao desenvolvimento de tecnologia e venda dos créditos de carbono são aspectos que certamente influenciarão positivamente no custo total da planta, no seu retorno financeiro e na sua viabilidade fazendo com que essa nova forma de gerar energia fique cada vez mais em evidência. Um estudo financeiro deve ser realizado para complementar a determinação do melhor modelo de campo solar com maior grau de precisão de acordo com o orçamento disponível para instalação e manutenção da planta.

## 7. REFERÊNCIAS

- Toro, C., Rocco, M. V., Colombo E., 2016. Exergy and Thermo-economic Analyses of Central Receiver Concentrated Solar Plants Using Air as Heat Transfer Fluid, *Energies*, vol. 9, n. 11, p. 885.
- Okoroigwe, E., Madhlopa, A., 2016. An integrated combined cycle system driven by a solar tower: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, p. 337-350.
- Energia Heliotérmica, < <http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/fatos/quais-sao-as-condicoes-ideais-para-construir-uma-usina> > Acessado em 12 de julho de 2017.
- Augsburger G., 2013. Thermo-economic optimisation of large solar tower power, Tese de doutorado, École Polytechnique Federale de Lausanne, Suíça.
- Lovegrove, K., Stein, W., 2012. Concentrating solar power technology: Principles, developments and applications. Woodhead Publishing, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- Quero, M., Korzynietzb, R., Ebertc, M., Jiménez, A.A., del Río, A., Briosoa, J.A., 2013. Solugas – Operation experience of the first solar hybrid gas turbine system at MWscale, *Energy Procedia*, vol. 49, p. 1820-1830.
- SOLGATE, 2015. Solar hybrid gas turbine electric power system – final publishable report. European Communities, Luxemburgo.
- Poživila, P., Agab, V., Zagorskiyb, A., Steinfeld, A., 2013. A pressurized air receiver for solar-driven gas turbines *SolarPACES*, *Energy Procedia*, vol. 49, p. 498-503.

### TECHNICAL REVIEW OF A HYBRID CSP CENTRAL TOWER PLANT WITH GAS TURBINE

**Abstract.** *The global demand for energy has been raising since industry revolution and with it has the impact on the climate change by humans. The use of solar energy can mitigate this impact and help to provide the energy needed by society. After travel through the space the energy issued by the sun reach the Earth atmosphere. Part of this energy does not suffer absorption or diffusion by the environment and touch the surface of the planet. This component of the energy is known as Direct Normal Irradiation (DNI) and is the only portion of the global solar irradiation that can be used on systems that Concentrate Solar Power (CSP) to generate energy. In this paper is presented a study of the*

*impact on the reduction of the consumption of fuel and emission of CO<sub>2</sub> to the atmosphere caused by the use of solar power.*

**Key Words:** *Direct Normal Irradiation (DNI), Concentrate Solar Power (CSP).*