

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
UNIVERSIDADE ABERTA DO BRASIL  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
APLICADA AOS PROCESSOS PRODUTIVOS**

Mateus Azevedo Chaves Correia

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DA HIBRIDIZAÇÃO DE UMA CALDEIRA  
A BIOMASSA COM CONCENTRADOR DE ENERGIA SOLAR**

Foz do Iguaçu, PR  
2017

**Mateus Azevedo Chaves Correia**

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DA HIBRIDIZAÇÃO DE UMA CALDEIRA A  
BIOMASSA COM CONCENTRADOR DE ENERGIA SOLAR**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de **Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos.**

Orientador: Prof. Dr. Flávio Dias Mayer

Foz do Iguaçu, PR  
2017

**Mateus Azevedo Chaves Correia**

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DA HIBRIDIZAÇÃO DE UMA CALDEIRA A  
BIOMASSA COM CONCENTRADOR DE ENERGIA SOLAR**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de **Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos.**

Aprovado em 05 de Agosto de 2017:

---

Flávio Dias Mayer, Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)

---

Giane de Campos Grigoletti, Dra. (UFSM)

---

Claudio Roberto Losekann, Dr. (UFSM)

Foz do Iguaçu, PR  
2017

## DEDICATÓRIA

*Dedico à pessoa que é meu exemplo de garra, força e perseverança  
e é detentora da minha maior admiração, minha amada mãe  
Irene de Azevedo Chaves.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus pelo o dom da Vida.

Aos meu pais que me proporcionaram a oportunidade de viver.

À minha mãe Irene, em especial, que sempre esteve presente em minhas decisões, ofereceu-me apoio aos estudos e se esforçou para que eu concluísse essa especialização.

Ao meu pai, meus irmãos e outros familiares pelo suporte e demonstração de amor e carinho durante a minha jornada de vida para que eu mantivesse a confiança em todos os meus sonhos.

Às minhas colegas de curso e de viagens ao polo de Foz do Iguaçu Juliana e Milena pela amizade desde a graduação e por compartilharem conhecimento e momentos de alegria durante essa trajetória.

Aos demais colegas de curso que compartilharam experiência contribuindo para o sucesso dessa jornada.

Ao professor Flávio Dias Mayer pela orientação, apoio e compreensão.

Ao corpo docente do curso de Pós-graduação em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos pelos ensinamentos compartilhados.

## RESUMO

### **AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DA HIBRIDIZAÇÃO DE UMA CALDEIRA A BIOMASSA COM CONCENTRADOR DE ENERGIA SOLAR**

AUTOR: Mateus Azevedo Chaves Correia  
ORIENTADOR: Flávio Dias Mayer

O presente trabalho desenvolve uma proposta de um projeto de hibridização para um ciclo de potência utilizando duas caldeiras, as quais estarão assistidas por concentradores de energia solar (CSP) do tipo linear Fresnel. Os dados industriais utilizados como base do projeto pertencem a uma indústria do setor de celulose localizada no estado de Mato Grosso do Sul. Esse setor está em crescimento no Brasil e necessita de projetos de eficiência energética para melhorar o seu rendimento. As tecnologias termossolares que funcionam como usinas estão em desenvolvimento em escala mundial e, no Brasil, as pesquisas se mostram mais favoráveis na utilização de concentradores de energia solar (CSP) em paralelo com geradores de vapor dentro da indústria, isso é, a hibridização de um sistema de cogeração para solar/biomassa. Os resultados desse trabalho demonstram que a hibridização, utilizando os concentradores solares, possuem ganhos energéticos na planta industrial. Adotou-se que o campo solar seja projetado para aumentar a temperatura da água condensada até o seu estado de vapor saturado à ser entregue para a caldeira. Encontrou-se uma economia no consumo de combustível de 78,22% de licor negro e 79,83% de biomassa (cavaco) após a hibridização da planta. A área calculada para atender essa demanda foi de 122,8 hectares de coletores solares do tipo Fresnel. Assim sendo, confirma-se o ganho energético dessa tecnologia, entretanto, deve-se realizar um estudo econômico para compreender a viabilidade do projeto.

**Palavras-chave:** Hibridização. Concentrador de energia solar. Biomassa.

## ABSTRACT

### ENERGY EVALUATION OF THE HYBRIDIZATION OF A BOILER BIOMASS WITH SOLAR ENERGY CONCENTRATOR

AUTHOR: Mateus Azevedo Chaves Correia

ADVISOR: Dr. Flávio Dias Mayer

The present work develops a proposal of a hybridization project for a power cycle using two boilers, which will be assisted by solar energy concentrators (CSP) of the linear Fresnel type. The industrial data used as the basis of the project belong to a pulp industry located in the state of Mato Grosso do Sul. This sector is growing in Brazil and requires energy efficiency projects to improve its performance. Solar thermal technologies that work as plants are developing on a global scale and, in Brazil, researches are more favorable in the use of solar energy concentrators (CSP) in parallel with steam generators within the industry, that is, the hybridization of a cogeneration system for solar / biomass. The results of this work demonstrate that the hybridization, using the solar concentrators, has energetic gains in the industrial plant. It has been assumed that the solar field is designed to increase the temperature of the condensed water to its saturated vapor state when delivered to the boiler. There was a fuel consumption saving of 78,22% of black liquor and 79,83% of biomass (chip) after the hybridization of the plant. The area calculated to meet this demand was 122,8 hectares of Fresnel solar collectors. Thus, it is confirmed the energy gain of this technology, however, an economic study must be carried out to understand the viability of the project.

**Keywords:** Hybridization. Concentrated solar power. Biomass.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Radiação solar global média anual do Brasil .....	7
Figura 2 - Mapa mundial da incidência da irradiação direta normal (DNI).....	8
Figura 3 - Tipos de concentradores solar .....	9
Figura 4 - Projetos de geração termossolar pelo mundo.....	11
Figura 5 - Sistema topping de cogeração.....	15
Figura 6 - Sistema bottoming de cogeração.....	16
Figura 7 - Variação da energia de um sistema fechado: (a) Variação detalhada através do tempo; (b) Esquematização padrão da variação de energia.....	19
Figura 8 - DNI anual em Campo Grande.....	24
Figura 9 - Frequência acumulada dos valores de DNI para Campo Grande.....	25
Figura 10 - Ciclo proposto da configuração atual .....	29
Figura 11 - Ciclo proposto da configuração com hibridização .....	34



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do ciclo termodinâmico da configuração atual .....	32
Tabela 2. Propriedades do ciclo termodinâmico da configuração com hibridização .	33
Tabela 3 - Dados utilizados para calcular a área do campo solar .....	35
Tabela 4 - Parâmetros das caldeiras da configuração atual .....	35

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS.....	3
1.1.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>3</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>3</b>
1.2	JUSTIFICATIVA.....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
2.1	ENERGIA SOLAR.....	5
2.2	O SOL COMO FONTE DE ENERGIA.....	6
2.3	CONCENTRADORES DE ENERGIA SOLAR .....	9
2.3.1	<b>Cenário solar mundial</b> .....	<b>10</b>
2.3.2	<b>Tecnologia CSP</b> .....	<b>11</b>
2.4	GERAÇÃO TERMOELÉTRICA HÍBRIDA SOLAR/COMBUSTÍVEL .....	13
2.4.1	<b>Hibridização CSP</b> .....	<b>13</b>
2.4.2	<b>Cogeração</b> .....	<b>14</b>
2.4.3	<b>Máquinas Térmicas</b> .....	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>23</b>
3.1	PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA.....	18
3.2	MODELAGEM DO SISTEMA TERMOSSOLAR .....	23
<b>4</b>	<b>SISTEMA HÍBRIDO BIOMASSA/SOLAR</b> .....	<b>28</b>
4.1	COGERAÇÃO.....	28
4.2	HIBRIDIZAÇÃO .....	32
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>35</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>39</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O setor de papel e celulose é caracterizado pelo alto grau de investimento e seu longo prazo de maturação devido ao grande porte dos projetos. Este setor pode ser dividido em três tipos de empresa: produtoras de celulose, produtoras de papel e as integradas (papel e celulose). Geralmente as fábricas estão localizadas junto à concentração dos ativos florestais da empresa, uma vez que costumam integrar todas as etapas do processo produtivo, desde a exploração florestal até a comercialização de celulose ou papel (PACHECO; CORREIA, 2015).

As indústrias de celulose possuem capital intensivo pois a escala de produção é elevada e está em ascensão em âmbito global. Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2016), os investimentos nos ativos florestais são alternativas para investidores com foco a longo prazo uma vez que possuem como sua principal vantagem a previsibilidade que proporciona segurança no mercado de *commodities*.

A previsão para os recursos energéticos mundiais em 2030 é que a demanda por energia duplicará em comparação aos dias atuais e as reservas de combustíveis não renováveis (gás natural, petróleo e afins) se esgotarão nos próximos cem anos (IBÁ, 2016). Com isso e somado às crises econômicas do setor, as políticas de eficiência energética ganham força e espaço entre os investimentos do setor público e privado.

Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (2016), o setor de papel e celulose busca a autossuficiência no consumo de energia em suas indústrias com plantas de cogeração através da queima do licor negro (ou lixívia), um subproduto industrial. Esta auto geração de energia, à partir do processo produtivo da celulose, representa em torno de 50% do consumo energético (eletricidade e vapor) do setor, sendo que, em algumas unidades é possível comercializar o excedente de eletricidade da cogeração para a rede elétrica nacional.

Algumas alternativas são estudadas para aumentar a produção de celulose com menor custo de energia e, atualmente, sistemas híbridos para geração de energia térmica e elétrica são propostos para indústrias em geral como projetos de eficiência energética dentro das empresas. Considera-se um sistema híbrido a utilização, conjuntamente, de mais uma fonte de energia para geração de energia elétrica e/ou térmica (RIBEIRO, 2015).

O sol, assim como a biomassa, é uma fonte renovável de energia que pode produzir vapor e eletricidade através de tecnologias de conversão existentes no mercado. Estima-se que, no intervalo de uma hora, a energia radiante proveniente da radiação emitida pelo Sol que chega à atmosfera terrestre é superior ao consumo de eletricidade da população mundial em um período de um ano, porém, apenas uma parcela dessa energia pode ser realmente aproveitada (RESTREPO, 2014).

Atualmente existem duas tecnologias disponíveis para converter a energia solar em energia útil: fotovoltaica e termossolar. A primeira, consiste na conversão direta de energia solar em eletricidade e a segunda utiliza a energia solar como fonte térmica para aquecimento de um fluido de trabalho (SÁ, 2013).

Integrar sistemas de geração limpa em plantas de cogeração trazem benefícios econômicos, ambientais e sociais. Em âmbitos econômicos, pode-se indicar a economia do combustível utilizado e/ou aumento da capacidade de geração de potência. O consumo de combustível fóssil conseqüentemente reduzido e a diminuição da emissão de gases poluentes são aspectos positivos em conceitos ambientais. As oportunidades de empregos no setor solar em contrapartida com os índices de mortes e acidentes na exploração de carvão em minas podem ser relacionadas aos benefícios sociais, além de que a comercialização dessa energia não se relaciona com conflitos políticos ou armados para controle das reservas de combustíveis fósseis (RESTREPO, 2014).

Segundo Galante (2015), os concentradores de energia solar (CSP – *Concentrated Solar Power*) são capazes de fornecer calor em alta temperatura para geração de potência, a partir da radiação solar direta concentrada. Uma das opções viáveis para essa tecnologia é sua utilização em sistemas híbridos de geração termelétrica ou cogeração. Esses sistemas podem dar suporte aos avanços financeiros e tecnológicos que o setor solar necessita para tornar cada vez mais viável a sua utilização.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Propor um modelo termodinâmico de um sistema híbrido (solar/biomassa) em um ciclo de cogeração utilizando energia termossolar em uma unidade industrial produtora de celulose relacionando com a redução no consumo de combustível e o incremento na geração de potência e vapor.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Apresentar um modelo termodinâmico da planta atual de cogeração da indústria de celulose.
- Analisar as condições climáticas de radiação solar na localidade industrial.
- Modelar o ciclo termodinâmico de uma planta de cogeração termoelétrica sob uma proposta de coletores termossolares do tipo linear Fresnel.
- Avaliar a redução de combustível para geração de energia após a hibridização da planta.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O setor de Papel e Celulose está em ascensão desde o ano de 1994, tendo um crescimento de 8,1% na produção de celulose no ano de 2016. Essa indústria é alta consumidora de vapor e eletricidade em seu processo industrial. O licor negro (ou lixívia), subproduto da produção de celulose, é queimado para recuperar quimicamente seus componentes e o calor resultante é utilizado para suprir a demanda industrial de energia, sendo que em algumas unidades há excedente na geração de eletricidade. Além do licor negro, os restos da biomassa florestal (casca, pontas e finos) são utilizados como combustível em outra caldeira para geração de energia (PACHECO; CORREIA, 2015).

Os concentradores de energia solar são uma opção real para diversificar a matriz energética brasileira e podem atuar em sistemas híbridos de plantas de cogeração. As indústrias de celulose, suprimindo sua demanda de energia através da energia solar, podem realizar diferentes pesquisas para a utilização do licor negro

(pode substituir derivados de petróleo em aplicações de alto valor agregado), além de comercializar o excedente de eletricidade na rede elétrica nacional.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para compreender a utilização da tecnologia CSP – *Concentrated Solar Power*, é necessário iniciar uma busca na literatura sobre o desenvolvimento dessa tecnologia para geração de energia térmica e/ou elétrica. Este capítulo apresenta os conceitos tecnológicos necessários para modelar uma planta termossolar inserida em um sistema de ciclo Rankine utilizando biomassa como combustível.

### 2.1 ENERGIA SOLAR

O Sol é uma esfera gasosa extremamente quente semelhante a um reator de fusão contínua retida por forças gravitacionais, sendo que sua temperatura alcança o valor de 5777 K (DUFFIE; BECKMAN, 2013). A energia produzida no interior da esfera solar é transferida através do espaço pela radiação solar e a sua intensidade é definida no valor de 1367 W/m<sup>2</sup>, que é conhecida como a constante solar ou *solar constant* ( $G_{sc}$ ), sendo que esse valor é baseado em medições fora da atmosfera terrestre (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

Entretanto, o valor da constante solar deve considerar a variação da distância entre o Sol e a Terra durante os dias do ano. Segundo Duffie e Beckman (2013) essa variação pode ser calculada através da equação 1.

$$G_{en} = G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (1)$$

Onde  $G_{en}$  é a radiação extraterrestre medido em um plano normal para a radiação no  $n$ ésimo (n) dia do ano.

A energia solar é a fonte energética mais abundante para a Terra possibilitando a sua captação e transformação. Apesar do grande potencial, o aproveitamento dessa energia é relativamente difícil por ser caracterizada como uma energia de baixa densidade. As pesquisas avançam para o desenvolvimento de tecnologias que possibilitam transformar a energia solar em energia útil com mais eficiência (LUQUE; HEGEDUS, 2003; PINHO; GALDINO, 2014).

Para Pinho e Galdino (2014) usar o termo “radiação solar” é uma forma genérica de se referir a irradiância solar (fluxos de potência) ou radiação solar total

(energia por unidade de área). Outras definições são apresentadas a seguir (DUFFIE; BECKMAN, 2013; PINHO; ROJAS, 2013; GALDINHO, 2014):

**Radiação direta** – A radiação solar que incide sobre uma superfície sem sofrer difusão na atmosfera. Essa parcela chega a representar em torno de 90% da radiação total em dias ensolarados com céu claro e sem nuvens e pode chegar a zero para dias muito nublados.

**Radiação difusa** – A Radiação solar que é recebida do sol e sofre interferência pela atmosfera terrestre alterando a sua direção. Sua representatividade é de menos de 10% para dias sem nuvens e de 100% para dias nublados.

**Radiação refletida** – Reflexão da radiação solar no solo ou em superfícies verticais. Essa parcela pode ser considerada irrisória no cálculo da radiação total, porém, pode chegar a 40% em regiões nevadas ou com edificações muito altas.

**Radiação solar total** – A soma entre a radiação direta, difusa e refletida na superfície. Também pode ser conhecida por radiação global.

**Irradiância solar** – A taxa de energia radiante incidente em uma superfície por unidade de área.

**Irradiância extraterrestre** – A energia incidente por unidade de área no topo da superfície da camada atmosférica da Terra.

Ou seja, a potência solar definida pela constante solar, ao chegar na Terra, tem espalhamento por diversos fatores. Uma parcela dessa energia é refletida na atmosfera e difratada pelas nuvens (radiação difusa) e outra parcela incide diretamente em um plano horizontal terrestre (radiação direta). Uma parcela da radiação, mesmo que irrisória, é refletida pelo solo (radiação refletida). Então, a radiação solar total ou radiação global é a soma das três parcelas de radiação que chegam na atmosfera terrestre (ROJAS, 2013; GALANTE, 2015).

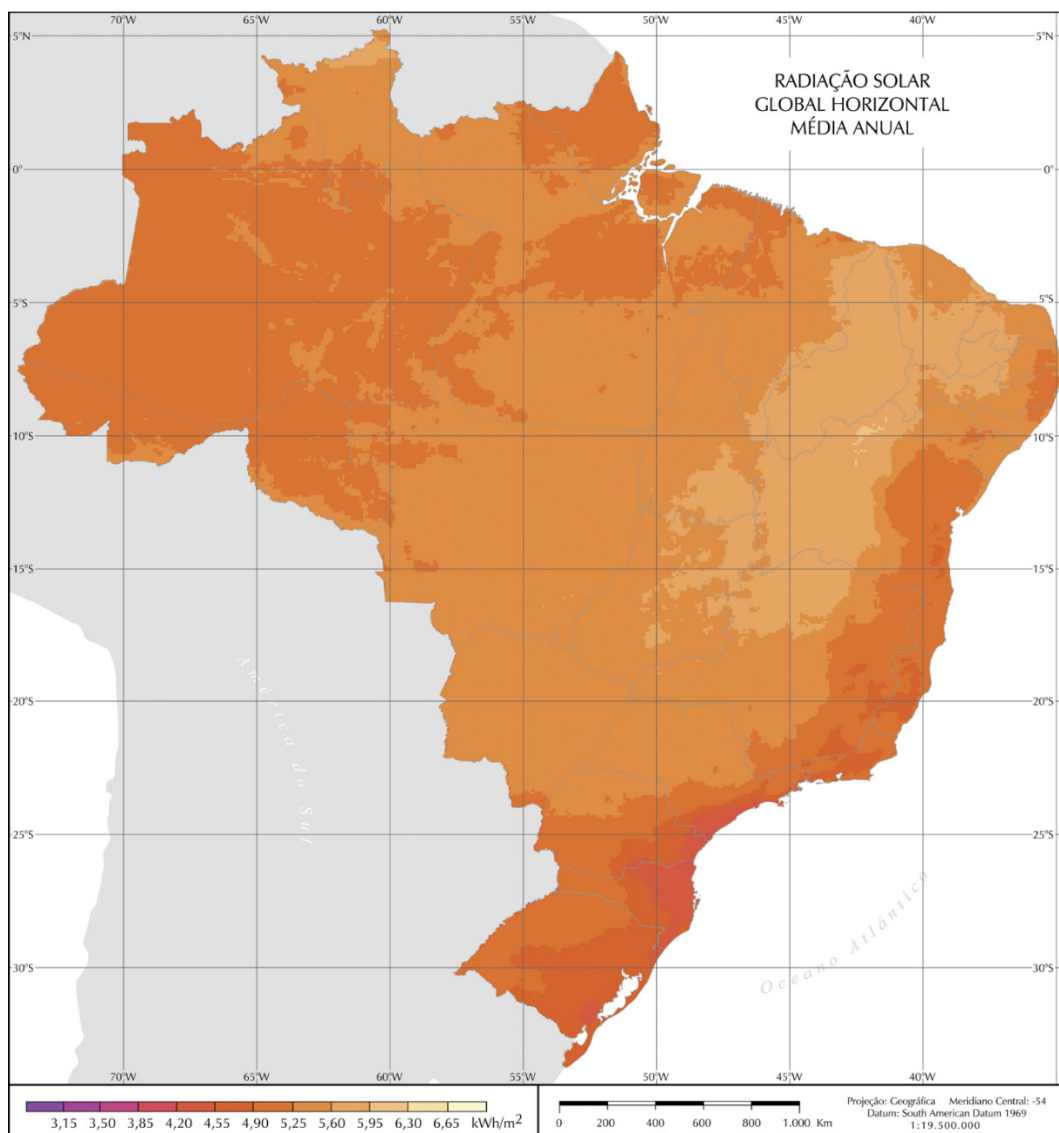
## 2.2 O SOL COMO FONTE DE ENERGIA

O Brasil possui alto potencial para utilização da energia solar como fonte primária de energia. A região Nordeste apresenta as maiores médias e a menor variabilidade anual de radiação solar entre as outras regiões geográficas brasileiras. A figura 1 apresenta as médias anuais para a radiação global horizontal e comprova que as maiores incidências estão na região nordeste, incluindo o noroeste de Minas Gerais. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar o valor máximo de radiação solar



no Brasil (6,5 kWh/m<sup>2</sup>) ocorre na região central da Bahia que apresenta um clima semiárido com baixa precipitação ao longo do ano, em contrapartida do litoral norte Catarinense que possui a menor radiação solar (4,25 kWh/m<sup>2</sup>) que é caracterizado pela alta ocorrência precipitação durante o ano (PEREIRA et al., 2006).

Figura 1 - Radiação solar global média anual do Brasil

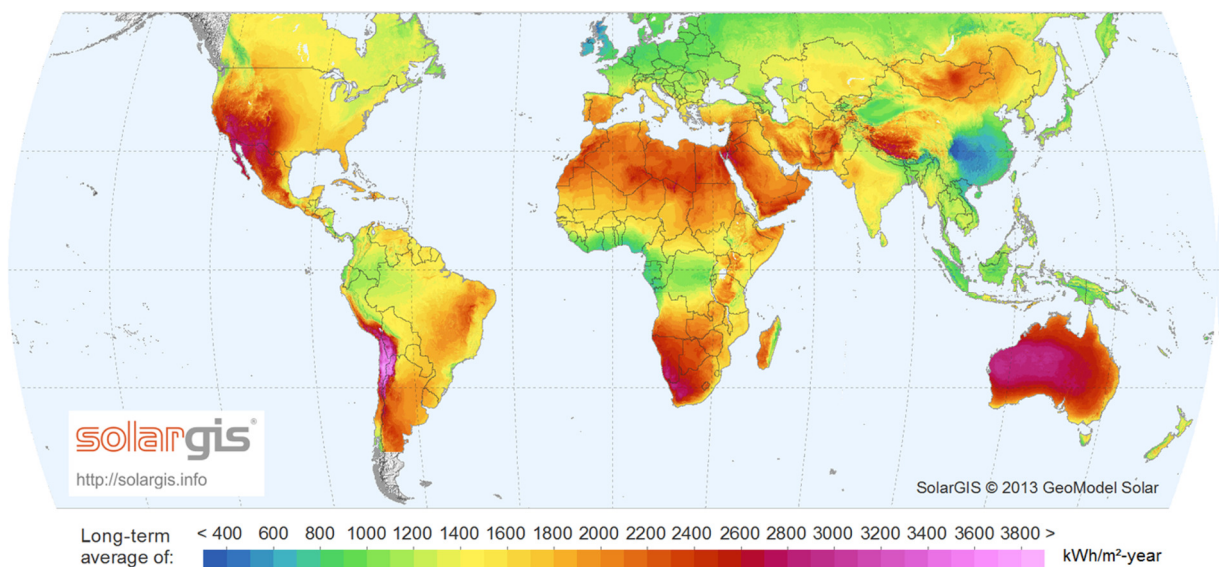


Fonte: (PEREIRA et al., 2006).

Em comparação entre a radiação média de outros países, o Brasil se destaca diante alguns países europeus que disseminam amplamente a utilização da energia

solar. A média anual brasileira varia entre 1500 e 2500  $kWh/m^2 \cdot ano$  que é superior à média da Alemanha (900 a 1250  $kWh/m^2 \cdot ano$ ), França (900 a 1650  $kWh/m^2 \cdot ano$ ) e Espanha (1200 a 1850  $kWh/m^2 \cdot ano$ ). Outras regiões como Austrália, parte da Índia, México, Chile, Peru, entre outros, possuem médias com valores acima de 3000  $kWh/m^2 \cdot ano$ , conforme figura 2 (BURIN, 2015).

Figura 2 - Mapa mundial da incidência da irradiação direta normal (DNI)



Fonte: (SOLARGIS *apud* BURIN, 2015, p. 37).

Para que a utilização da tecnologia solar atinja a viabilidade econômica alguns fatores de projeto precisam ser considerados e avaliados, tais como: custos de capital, operação e manutenção, eficiência do sistema, utilização híbrida com outras tecnologias, localidade do projeto, valor contratual da eletricidade, taxa de juros, entre outros (BURIN, 2015).

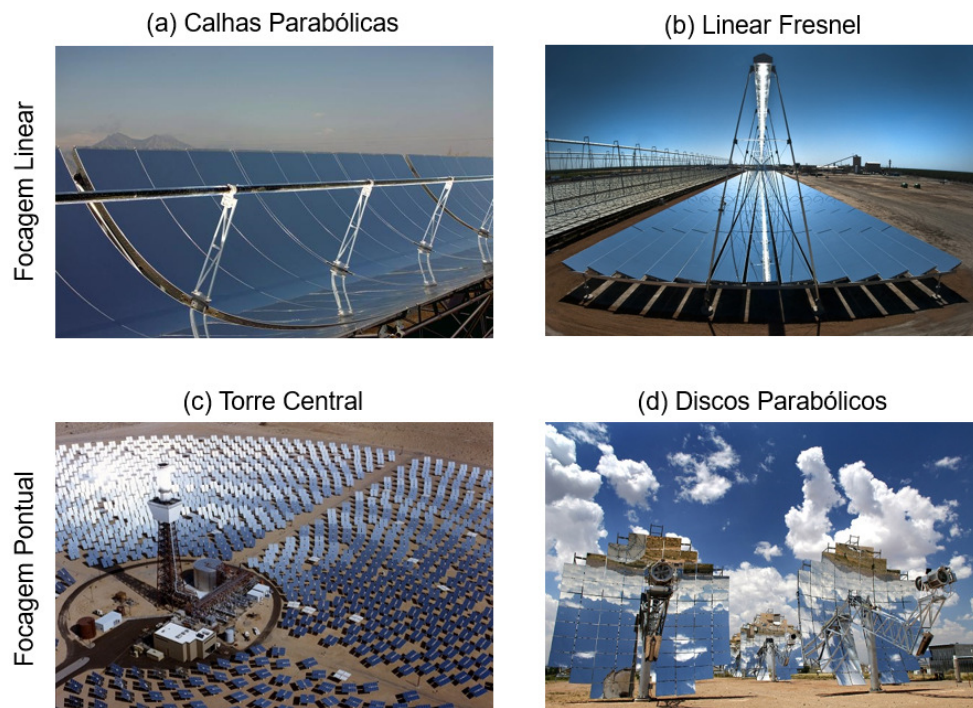
Essa fonte de energia pode ser utilizada para geração de eletricidade direta através de painéis fotovoltaicos ou na geração de energia térmica utilizando o calor da irradiação solar (termossolar). As duas tecnologias vêm sendo estudadas para aumento da eficiência na conversão de energia e apresentam avanços no mercado (GALANTE, 2015).

## 2.3 CONCENTRADORES DE ENERGIA SOLAR

A tecnologia termossolar visa utilizar a energia térmica do Sol para aquecer um fluido de trabalho. Uma das formas de absorver essa radiação é com placas espelhadas que refletem e concentram os raios solares incidentes para o foco da placa, onde se encontra o fluido de trabalho. Dessa forma, consegue-se valores de temperatura mais elevados e essa tecnologia é conhecida como Concentrador de Energia Solar (*Concentrated Solar Power – CSP*)

Em geral, as formas de concentrar a energia solar podem ser divididas em focagem linear e pontual, porém, ambas possuem refletor, receptor e fluido de trabalho para a geração de energia. A Calha Parabólica e o Linear Fresnel pertencem às tecnologias de focagem linear, enquanto que os de foco pontual é a Torre Central e os Discos Parabólicos - veja a Figura 3.

Figura 3 - Tipos de concentradores solar



Fonte: Adaptado de SOLAR ENERGY INDUSTRIES ASSOCIATION (2017).

Os sistemas de foco linear são aqueles que utilizam espelhos para refletirem a radiação solar direta para uma tubulação chamada de receptor linear situado na linha focal do sistema espelhado. Um fluido de trabalho circula pelo interior do tubo e é aquecido através da radiação solar convertendo-a em energia térmica. O tipo do fluido que escoar pelo tubo depende da temperatura que se deseja alcançar (ROJAS, 2013).

As plantas que utilizam esse sistema necessitam de uma série de subsistemas adicionais que conectem o campo de coletores à aplicação correspondente (um processo industrial ou um bloco de potência). A quantidade de filas conectadas em paralelo depende da potência térmica nominal do campo solar e, em série, depende do incremento de temperatura (salto de entalpia) que o fluido de trabalho necessita para sua finalidade (ROJAS, 2013).

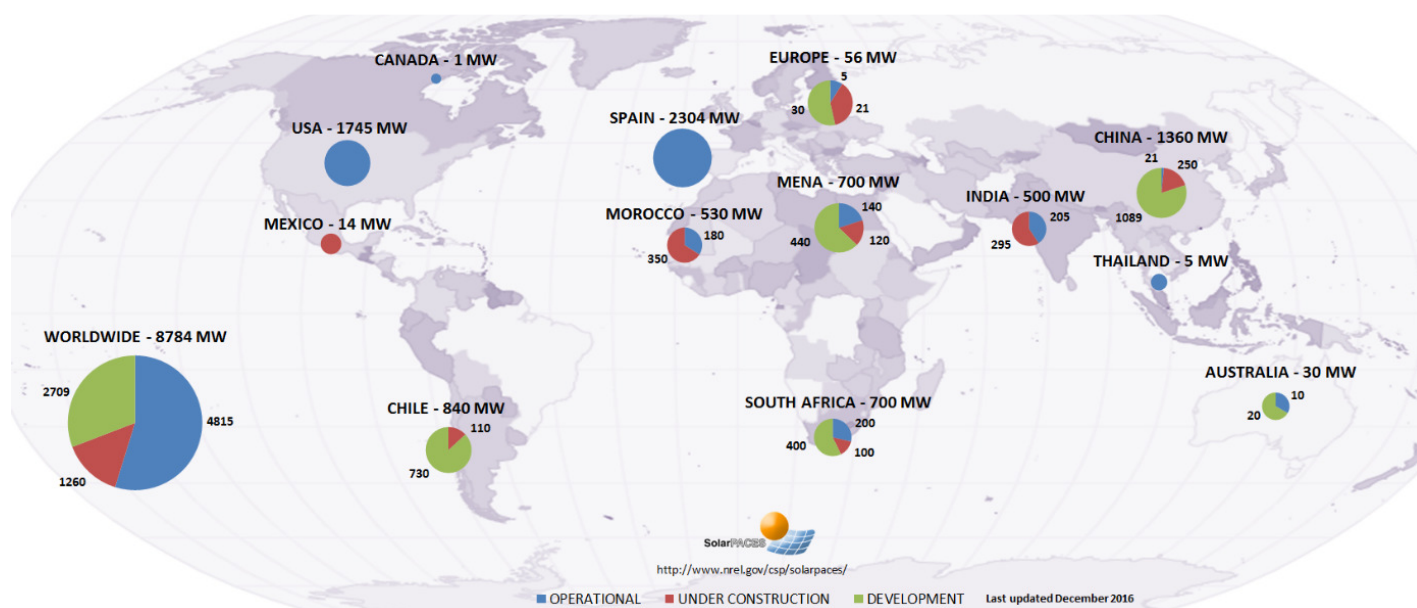
Entretanto, os sistemas que demandam altas temperaturas (superiores a 400°C) utilizam os concentradores de foco pontual, pois requerem o aumento do fluxo energético incidente sobre o receptor e a redução das perdas energéticas ao meio externo (ROJAS, 2013).

### **2.3.1 Cenário solar mundial**

O potencial instalado de geração de eletricidade através dos concentradores de energia solar em torno do mundo é classificado por: projetos em operação, em construção e em desenvolvimento; e está apresentado na figura 4. Atualmente a capacidade instalada é de 4,8 GW que representa 55% de todos os tipos de projetos existentes na área, isto é, a capacidade instalada é aproximadamente a metade do potencial estudado pelo mundo.

A Espanha representa 48% dos projetos em operação ao redor do mundo, seguidos dos EUA com 36% e a Índia com 4%. O Marrocos é o país com maior potencial de CSP em construção representando 28% do total.

Figura 4 - Projetos de geração termossolar pelo mundo



Fonte: (SOLARPACES, 2017).

Burin (2015) apresenta os dados dos projetos de CSP para o ano de 2015, assim, pode-se perceber que essa tecnologia obteve um crescimento no âmbito operacional de 846 MW (21,3%) até dezembro de 2016, e os projetos em construção obtiveram o aumento de 220,5 MW (21,2%). Em contrapartida, os projetos em desenvolvimento diminuíram em torno de 1,7 GW (39%) refletindo na diminuição da capacidade total de geração de eletricidade através de concentradores solares.

### 2.3.2 Tecnologia CSP

Entre as tecnologias de concentradores de energia solar, as do tipo calha parabólica são as mais difundidas atualmente em torno do mundo representando aproximadamente 3,9 GW (87,3%) da potência elétrica em operação. As do tipo linear Fresnel representam em torno de 0,14 GW (3,1%) entre as tecnologias CSP's e a torre solar 0,57 GW (12,6%) (CSP WORLD, 2017).

### *Calha Parabólica*

Os coletores tipo calha parabólica são espelhos côncavos com o perfil de uma parábola posicionados para se movimentarem rastreando o caminho do Sol (leste-oeste) em um campo solar orientado segundo a direção norte-sul. Paralelo ao seu eixo axial e na linha focal dos espelhos, encontra-se um tubo metálico recoberto por um tubo de vidro que absorve a radiação solar conhecido por tubo absorvedor. O fluido de trabalho escoia pelo tubo e transporta energia térmica para geração de potência ou armazenamento desta energia (GALANTE, 2015; RESTREPO, 2014).

Esta tecnologia é a mais difundida no mundo, representando mais de 87% dos projetos de concentradores solares e é a mais avançada entres as experiências e desenvolvimento das pesquisas industriais em relação ao CSP (CSP WORLD, 2017; KALOGIROU, 2004). Em geral, esses coletores possuem alta eficiência óptica e ocupam um espaço 3,5 vezes maior do que a área de abertura dos coletores. (MORIN et al., 2012).

### *Linear Fresnel*

O sistema dessa tecnologia possui espelhos planos ou com pequena curvatura dispostos lado a lado e refletem a radiação solar para um concentrador secundário que, por sua vez, focaliza a radiação para um tubo absorvedor que escoia o fluido de trabalho. Os espelhos possuem um sistema de rastreamento do percurso do sol no sentido leste-oeste e os campos são orientados no sentido norte-sul (GALANTE, 2015). Dessa forma, a tecnologia Fresnel possui um certo caráter híbrido entre os coletores de focagem linear e pontual que foi criada com a finalidade de reduzir os custos da energia oriunda do Sol.

Essa tecnologia possui menor rendimento pois aproveitam menor fração da radiação solar direta, em compensação, o custo de investimento também é menor comparado com as calhas parabólicas (RESTREPO, 2014; ROJAS, 2013). A área de terreno necessária para essa tecnologia é duas vezes maior que a área dos coletores, existe perdas de eficiência óptica devido a sua simplificação na geometria e fabricação (MORIN et al., 2012).

### *Torre Central*

A tecnologia de torre central é um grande grupo de espelhos planos, também conhecidos como heliostatos, que possuem rastreamento nos dois eixos e refletem a

radiação solar em um absorvedor no topo de uma torre, de tal forma que, o fluido de trabalho absorve o calor possibilitando a geração de energia. Conforme Galante (2015, p. 27), “no absorvedor da torre solar encontra-se um feixe de tubos associados a uma estrutura porosa para melhor troca térmica”. O fluido de trabalho é aquecido operando em temperaturas em torno de 1000°C favorecendo ciclos de alta eficiência com a geração de vapor em altas temperaturas. Essa tecnologia apresenta interesse comercial para projetos com temperaturas mínimas de 500°C e sua aplicabilidade mais interessante é na geração de eletricidade (GALANTE, 2015; RESTREPO, 2014; ROJAS, 2013).

### *Discos parabólicos*

Os discos parabólicos são refletores espelhados esféricos de vidro com curvatura parabólica e convergem a radiação solar no ponto focal da sua parábola onde se encontra um receptor. Normalmente um motor-gerador (por exemplo, motor de ciclo Stirling) está acoplado no receptor que recebe a energia térmica do fluido de trabalho aquecido pela radiação solar. Esse sistema disco/Stirling demonstram uma maior eficiência na conversão da radiação solar em elétrica e uma de suas principais vantagens é a modularidade, já que a potência elétrica total da planta pode ser multiplicada de acordo com a quantidade de unidades do sistema disco/Stirling (GALANTE, 2015; ROJAS, 2013).

## 2.4 GERAÇÃO TERMOELÉTRICA HÍBRIDA SOLAR/BIOMASSA

### **2.4.1 Hibridização CSP**

A hibridização CSP pode ser aplicada tanto para novas plantas industriais quanto as que já estão em funcionamento. Aproveitar a mesma infraestrutura para utilização de duas ou mais tecnologias diferentes reduz os custos da geração de energia e apresenta um investimento de retorno mais rápido e de menor risco. Além disso, diferentes possibilidades podem ser projetadas quando há outras opções de fonte de matéria-prima, por exemplo, a energia solar pode ser utilizada para deslocar o consumo de combustível durante as horas ensolaradas possibilitando o acréscimo na capacidade de geração de eletricidade ou no armazenamento térmico (BURIN, 2015; GALANTE, 2015).



A energia solar pode ser integrada em ciclos híbridos produzindo vapor ou gerando energia elétrica adicional. Segundo McDonald (1986, *apud* GALANTE, 2015 p. 28), a primeira proposta do conceito de hibridização tinha a finalidade da economia do combustível para geração de eletricidade através do incremento da energia solar. Um ciclo fechado à gás foi proposto para atuar com a *performance* semelhante ao de discos parabólicos que aqueceriam um fluido de trabalho pressurizado e uma caldeira de leito fluidizado que utiliza lixo urbano como combustível (BURIN, 2015; GALANTE, 2015).

A hibridização do CSP com caldeiras de biomassa fornece diferentes opções para ser aplicado nas plantas industriais. Peterseim et al. (2014b) classifica as opções híbridas para CSP em leves, médios e fortes e combina-os com outras fontes de energia como carvão, gás natural, biomassa e resíduos, geotérmica e vento. As opções de hibridização são abundantes desde o aquecimento de água de alimentação, o aquecimento do vapor, o vapor vivo ao superaquecimento do vapor, com algumas opções mais adequadas para uma combinação específica de fontes de energia do que outras.

Diferentes cenários podem ser analisados através da hibridização. Peterseim et al. (2014a) analisaram 17 cenários diferentes para um sistema de biomassa e CSP de todos os tipos, eles apresentam uma diferença de investimento de até 31% entre as configurações e uma redução de 69% em comparação com um investimento de um sistema solar independente. Soria et al. (2015) afirma que a geração de eletricidade através de concentradores de energia solar isolados ainda não são uma realidade para o Brasil, porém a sua utilização em sistemas híbridos nas indústrias brasileiras gera ganhos energéticos, financeiros e sociais com a geração de novos empregos.

#### **2.4.2 Cogeração**

O termo cogeração pode ser definido como a geração simultânea de calor e potência elétrica e/ou mecânica a partir de uma mesma fonte de energia primária, para atender as necessidades de uma unidade de processo (FERREIRA, 2008).

O uso da cogeração tem sido enfatizado pelas mudanças no mercado de energia elétrica devido à degradação da qualidade dos serviços de eletricidade, aumento do risco de desabastecimento, elevação das tarifas de fornecimento,

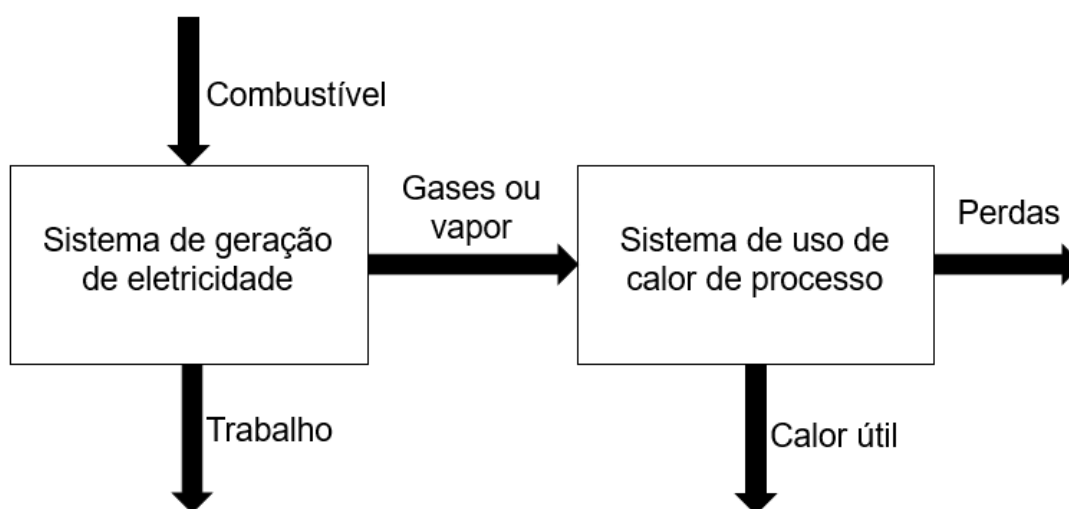


necessidades do processo industrial e perspectivas de geração de receitas adicionais e/ou redução de custos. Sobretudo, no Brasil a cogeração vem sendo aplicada com maior intensidade em usinas sucroenergéticas e de celulose, ou indústrias integradas de papel e celulose, como também em sistemas isolados com reduzido impacto no sistema interligado (SANTOS; NOVO, 2008).

Os sistemas de cogeração são classificados em dois grandes grupos: sistemas *Topping* e *Bottoming*, que por sua vez estão relacionados à ordem do fluxo de calor e sua conversão em energia mecânica nos sistemas.

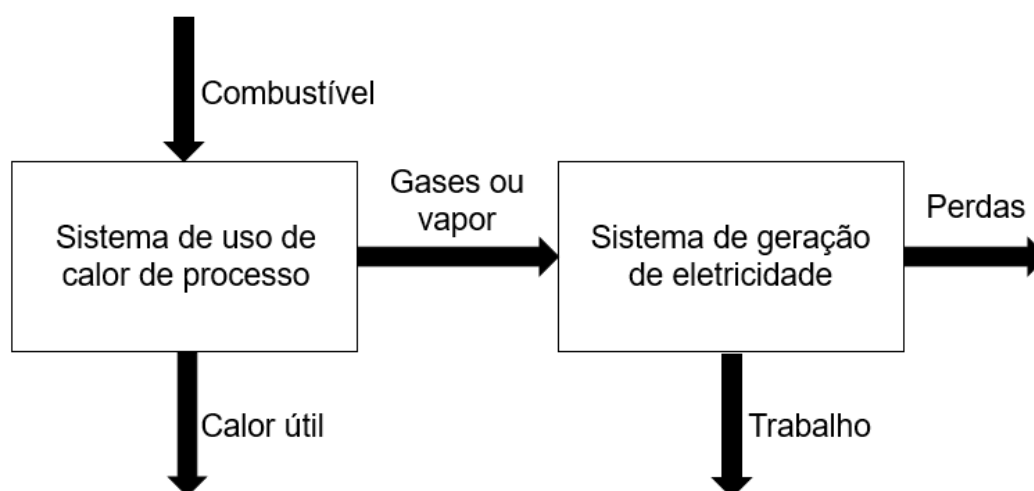
Na configuração *Topping* a geração de energia elétrica antecede a produção de calor, em que o calor residual da queima do combustível utilizado para a produção de eletricidade é aproveitado como vapor de processo. Já nos sistemas *Bottoming*, o calor da queima do combustível é utilizado primeiramente em um processo térmico da indústria, e o calor residual deste processo é aproveitado em uma caldeira recuperadora para gerar vapor que acionará um turbogerador para produzir energia elétrica (SANTOS; NOVO, 2008). Os dois sistemas estão representados nas figuras 5 e 6.

Figura 5 - Sistema *topping* de cogeração



Fonte: Adaptado de PACHECO e CORREIA (2015).

Figura 6 - Sistema *bottoming* de cogeração



Fonte: Adaptado de PACHECO e CORREIA (2015).

O sistema mais utilizado na cogeração é o *topping*, em virtude das baixas temperaturas do calor rejeitado dos processos industriais, dificultando a produção do vapor para acionamento de um turbogerador.

A escolha da tecnologia mais adequada a cada aplicação envolve a análise da relação potência e calor de processo, qualidade do combustível e outras variáveis. Contudo, diferentes arranjos de equipamentos podem ser adotados, como simples turbinas a vapor acopladas a caldeiras convencionais, uso de motores de combustão interna, até sistemas mais complexos com a utilização de gaseificadores em conjunto com sistemas de ciclo combinado (turbina a gás e turbina a vapor).

### 2.4.3 Máquinas Térmicas

#### *Caldeira*

As caldeiras são equipamentos com a finalidade de transferir a energia da queima de um combustível (sólido, líquido ou gasoso) em energia útil transmitida ao fluido de trabalho, aumentando desta forma, a entalpia do fluido. Segundo a Norma Regulamentadora das Caldeiras e Vasos de Pressão – NR 13 (BRASIL, 2014), as caldeiras são destinadas a produzir e acumular vapor com pressão acima da pressão atmosférica.

Sua aplicação no meio industrial é na produção de vapor de água ou no aquecimento de fluidos térmicos e pode apresentar grandes perdas de energia se não mantiverem as condições ideais de operação, além de práticas corretas de manuseio e manutenção constante (ELEKTRO, 2008).

As caldeiras podem ser classificadas pela sua finalidade de uso, fonte de aquecimento, tipo de fornalha, pressão de funcionamento, conteúdo nos tubos, etc.

Existem caldeiras capazes de aquecer o fluido através de energia elétrica, no qual são utilizados eletrodos ou resistências para aquecer água. Esse tipo de caldeira foi utilizado durante a década de 1980 enquanto havia grande oferta de energia elétrica. Outros tipos de caldeiras capazes de gerar vapor através da queima de combustíveis são classificados de acordo com o conteúdo dos tubos em dois grupos: flamotubulares e aquatubulares (ELEKTRO, 2008)

Nas caldeiras aquatubulares os gases de combustão aquecem a água que está por dentro dos tubos, sendo que esses tubos podem estar organizados em feixes ou em paredes de água. Esse tipo de caldeira possui uma capacidade de produção de vapor por unidade de área de troca de calor maior que as caldeiras flamotubulares e podem custar até 50% a mais. Já as caldeiras flamotubulares são constituídas por gases da combustão circulando pelo interior dos tubos que estão em contato com a água a ser aquecida (ELEKTRO, 2008).

### *Turbina a vapor*

As máquinas de fluxo geradoras (turbinas) são classificadas em hidráulicas, a vapor ou a gás, que tem por finalidade retirar a energia cinética e/ou potencial do fluido e transformá-la em energia mecânica.

Turbina a vapor é o equipamento capaz de transformar a energia térmica contida no vapor de água em energia cinética para geração de energia mecânica, podendo definir turbina a vapor como máquina térmica de fluxo motora (MARTINELLI JUNIOR, 2002).

Toda turbina é composta de duas partes principais: o estator (roda fixa) onde estão distribuídos os componentes capazes de transformar a energia do vapor em energia cinética; e o rotor (roda móvel) que possui componentes destinados a transformar a energia cinética em energia mecânica sobre o eixo do motor.

As Classificações das turbinas a vapor seguem os seguintes critérios:

1. Pressão de saída na turbina

- a. Condensação (produzir energia elétrica podendo apresentar ou não extração de vapor no seu corpo)
  - b. Contrapressão (pressão e temperaturas compatíveis às necessidades industriais)
2. Segundo o modo de ação do vapor sobre as palhetas
    - a. Turbinas de ação
    - b. Turbinas de reação
    - c. Turbinas mistas
  3. Número de estágios
    - a. Turbinas simples
    - b. Turbinas múltiplas
  4. Direção do escoamento
    - a. Turbina axial
    - b. Turbina radial
  5. Natureza do vapor d'água
    - a. Vapor saturado (seco e úmido)
    - b. Vapor superaquecido
  6. Modo de admissão do vapor
    - a. Injeção total
    - b. Injeção parcial
  7. Pressão do vapor
    - a. Baixa pressão (até 30 kgf/cm<sup>2</sup>)
    - b. Média pressão (de 30 a 100 kgf/cm<sup>2</sup>)
    - c. Alta pressão (mais de 100 kgf/cm<sup>2</sup>)

#### **2.4.4 Primeira Lei da Termodinâmica**

Segundo Bejan (2006) um dos princípios da termodinâmica é que a troca de trabalho e calor são as únicas formas possíveis de interação da energia e isso é intitulado como a Primeira Lei da Termodinâmica. Max Planck traduz a primeira lei como o princípio de conservação da energia aplicado ao fenômeno envolvendo a produção ou absorção de calor (BEJAN, 2006 p. 4). Considerando um sistema fechado, pode-se esquematizar (figura 7) a variação de energia através do estado

inicial e final do sistema e equacionar a interação das propriedades envolvidas (equação 2).

$$Q_{1-2} - W_{1-2} = E_2 - E_1 \quad (2)$$

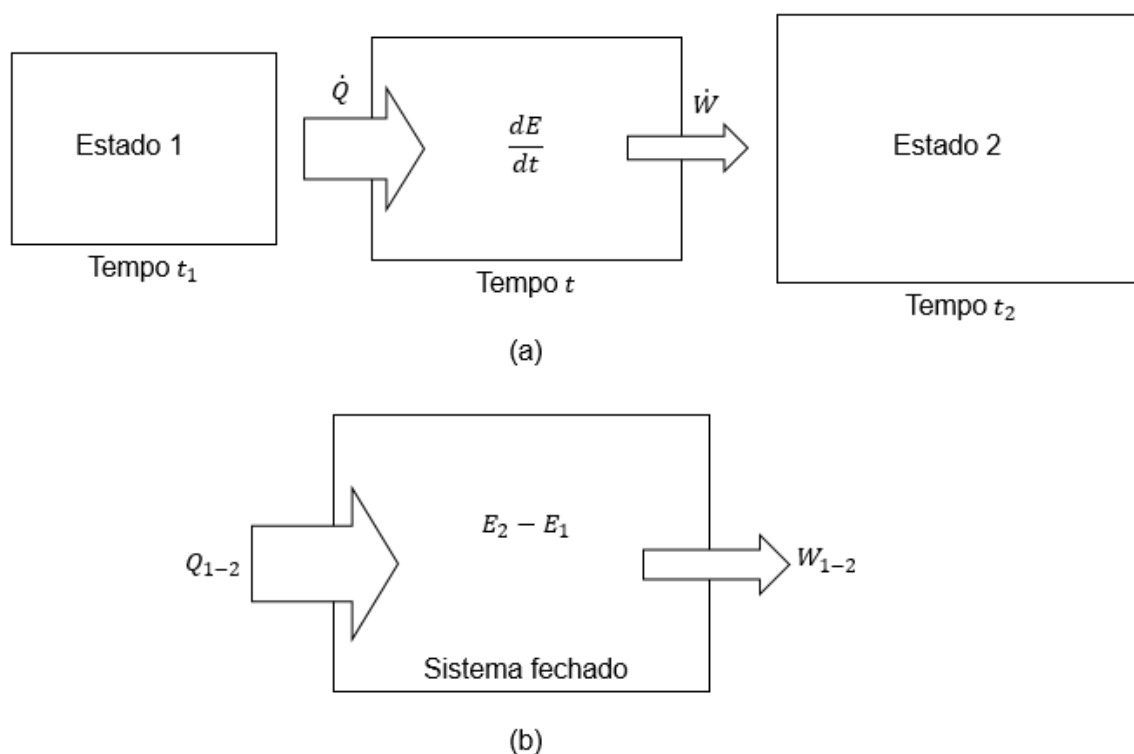
Onde,

$Q_{1-2}$  = transferência de calor;

$W_{1-2}$  = transferência de trabalho;

$E_2 - E_1$  = troca de energia (propriedade).

Figura 7 - Variação da energia de um sistema fechado: (a) Variação detalhada através do tempo; (b) Esquematização padrão da variação de energia



Fonte: Adaptado de BEJAN (2006, p. 6).

Para Moran et al. (2013), o estudo de sistemas e processos pela primeira lei da termodinâmica baseia-se na conservação da energia e massa. O princípio da conservação de massa analisa, unicamente, o fluxo de massa que está entrando e

saindo do volume de controle e pode ser expressada matematicamente pela equação 3:

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (3)$$

Onde,

$\sum \dot{m}_e$  = somatório dos fluxos de massa na entrada do volume de controle;

$\sum \dot{m}_s$  = somatório dos fluxos de massa na saída do volume de controle;

Sendo  $dm_{VC}/dt$  a taxa temporal de variação de massa contida no interior do volume de controle no instante  $t$ , função das vazões mássicas instantâneas nas entradas e nas saídas da fronteira do volume de controle considerado (MORAN *et. al.*, 2013).

Na análise dos sistemas do presente estudo foram considerados volumes de controle em regime permanente, ou seja, a situação da massa em seu interior e em sua fronteira não se altera com o tempo e, portanto, a taxa total do fluxo de massa entrando no volume de controle é igual à taxa total do fluxo de massa que sai do volume de controle, como expresso pela equação 4:

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (4)$$

A primeira lei estabelece que os únicos caminhos para variar a energia de um sistema fechado são através da transferência de energia por meio de trabalho ou de calor, sendo a energia sempre conservada (MORAN *et. al.*, 2013).

A variação da energia total de um sistema é composta de três contribuições macroscópicas, sendo elas: (a) variação de energia cinética, que está associada ao movimento do sistema como um todo em relação a um sistema de eixos coordenados externo; (b) variação da energia potencial, associada à posição do sistema como um todo no campo gravitacional terrestre; e (c) variação de energia interna, a qual reúne todas as outras variações de energia (BEJAN, 2006).

A energia, assim como a massa, é uma propriedade extensiva e, portanto, pode ser transferida para dentro ou para fora de um volume de controle como resultado da massa que atravessa a fronteira (MORAN *et. al.*, 2013). Dessa forma, para um volume

de controle com vários locais na fronteira através dos quais a massa entra ou sai, o balanço da taxa de energia é dado como exposto na equação 5.

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum \dot{m}_s \left( h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (5)$$

Sendo que, o subscrito “vc” é adicionado nos termos para indicar que a taxa de transferência acontece ao longo da fronteira do volume de controle e os subscritos “e” e “s” significam os termos de entrada e saída, respectivamente.

$\frac{dE_{VC}}{dt}$  = taxa temporal de variação de energia contido no interior do volume de controle no instante t;

$\dot{Q}_{VC}$  = transferência de calor no volume de controle;

$\dot{W}_{VC}$  = transferência de trabalho no volume de controle;

$h$  = entalpia;

$V$  = velocidade de escoamento;

$g$  = gravidade;

$z$  = altura da cota do fluido em relação a uma altura de referência.

A equação 5 enuncia que o aumento ou decréscimo da taxa de energia no interior do volume de controle é igual à diferença entre as taxas de transferência de energia entrando ou saindo ao longo da fronteira, sendo os mecanismos de transferência o calor, o trabalho e a energia que acompanha a massa entrando ou saindo.

Para um volume de controle em regime permanente, a situação da massa em seu interior e em suas fronteiras não se altera com o tempo, bem como as vazões mássicas e as taxas de transferência de energia por calor e trabalho, não existindo acúmulo algum de massa no seu interior (MORAN *et. al.*, 2013). Ainda, considerando desprezíveis as variações da energia cinética e potencial entre as entradas e saídas, a equação 5 pode ser reescrita na equação 6.

$$\dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s = 0 \quad (6)$$

A análise da primeira lei quanto ao desempenho de um sistema que percorre um ciclo de potência (ou eficiência térmica) é descrita em termos da extensão na qual

a energia adicionada por calor ( $Q_{cald}$ ) é convertida em trabalho líquido na saída ( $W_{ciclo}$ ), e pode ser expressa como a equação 7 (MORAN *et. al.*, 2013):

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{ciclo}}{\dot{Q}_{cald}} \quad (7)$$

$\eta_I$  = eficiência térmica do ciclo.

A eficiência termodinâmica para um volume de controle, apresentada na equação 8, envolve a análise do trabalho realizado no VC relacionado com o trabalho produzido em um processo hipotético isentrópico (entropia constante) desde o mesmo estado de entrada até a mesma pressão de saída. Para que um processo seja isentrópico, é necessário que ele seja adiabático e reversível.

$$\eta_{VC} = \frac{W_{VC}}{m\Delta h_{iso}} \quad (8)$$

Para as caldeiras, a expressão de eficiência é dado pela equação 9 (MORAN *et. al.*, 2013):

$$\eta = \frac{\dot{m}_v h_v - \dot{m}_a h_a}{\dot{m}_{comb} PCI_{comb}} \quad (9)$$

Sendo que, os subscritos “v” e “a” significam vapor e água de alimentação, respectivamente e o “comb” referencia o combustível em questão. PCI significa Poder Calorífico Inferior e é o valor da energia liberada na forma de calor de um combustível.



### 3 METODOLOGIA

Para a análise das configurações de ciclo a vapor com caldeira de recuperação química e caldeira de biomassa, foram apresentados conceitos e equações relacionados a Primeira Lei da Termodinâmica, conseqüentemente, a conservação da massa e energia.

A metodologia aplicada para a realização dos cálculos considera que cada equipamento dos sistemas é abordado como um volume de controle em regime permanente, ou seja, regiões delimitadas por uma fronteira prescrita através da qual há fluxo de massa e cujo comportamento não varia com o tempo, além disso, as perdas de calor serão desprezadas.

O acoplamento do sistema termossolar será realizado no abastecimento da água de alimentação da caldeira e tem o objetivo de aumentar a temperatura do fluido para até a temperatura de saturação na pressão da caldeira (300,1 °C) utilizando o concentrador de energia solar do tipo linear Fresnel. Essa composição requer analisar o sistema CSP como um trocador de calor para o fluido considerando o Sol como a fonte de energia.

#### 3.1 MODELAGEM DO SISTEMA TERMOSSOLAR

Para as tecnologias solares, a irradiância solar direta (DNI – *direct normal irradiance*) é um dos parâmetros mais relevantes para a modelagem do sistema. Esse valor mensura a quantidade de energia solar que atingirá uma determinada localidade na superfície terrestre através de um plano normal ao sol (BLANC, 2014). De acordo com o padrão da Organização Internacional de Padronização (ISO – *International Organization for Standardization*), a DNI é definida como o quociente do fluxo radiante em uma determinada superfície de um plano receptor recebida de um pequeno ângulo sólido do céu, centrado na posição do sol; se o plano é perpendicular ao eixo do ângulo sólido, então a irradiância recebida é do ângulo normal (INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1999).

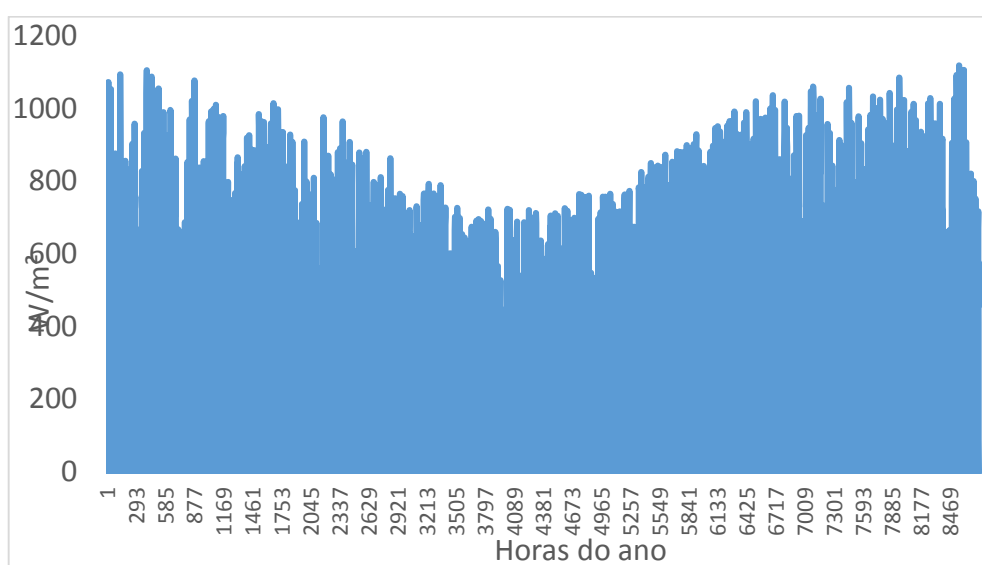
O projeto do *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA), juntamente com o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e LABSOLAR/UFSC (Laboratório de Energia Solar/Universidade Federal de Santa Catarina), disponibiliza arquivos climáticos do ano típico meteorológico (TMY – *Typical*

*Meteorological Year*) para 20 cidades brasileiras. Os dados do TMY representam um ano típico baseado em medições de vários anos anteriores. A totalidade da radiação solar original e os dados meteorológicos são condensados em um ano nas condições mais comuns, ou seja, um conjunto de dados de vários anos é analisado e doze meses são escolhidos para representar as condições típicas, assim, definem-se os dados do TMY.

A planta industrial a ser analisada se localiza na cidade de Três Lagoas/MS e o centro de medições dos valores de TMY utilizados são medidos na cidade de Campo Grande/MS há 326 km de distância e são apresentados na figura 8. Para finalidade de cálculos do projeto, faz-se necessário utilizar um valor de DNI de projeto ( $DNI_p$ ) e, segundo Burin (2015), uma abordagem comum consiste na exclusão dos valores de irradiância menores que  $250 \text{ W/m}^2$  e encontrar o ponto que representa o percentil de 95%. Esta análise é feita, pois, se o ponto de projeto for muito alto, o campo solar operará em plena carga durante um período muito curto e, se for muito baixa, haverá muitas horas de um ano que o campo solar estará defasado.

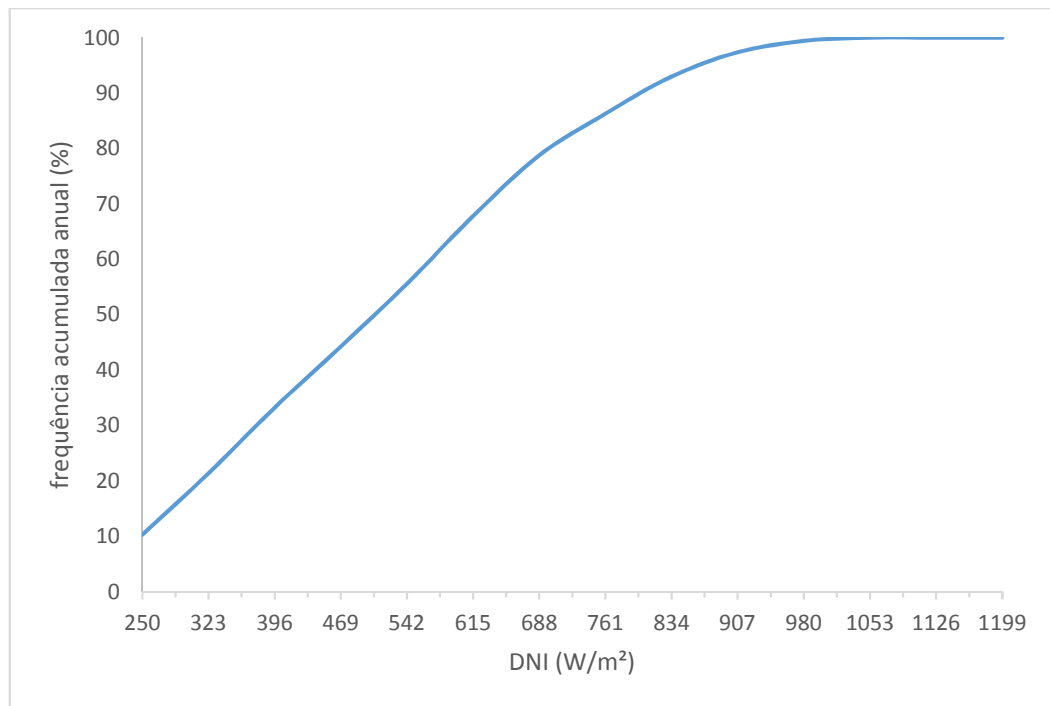
Os dados do DNI de Campo Grande foram coletados através do SWERA e apresentados na Figura 8, sendo que, para o ponto de projeto, os dados foram tratados e apresentados na Figura 9 e atribuído o valor para  $DNI_p$  como  $867,3 \text{ W/m}^2$ .

Figura 8 - DNI anual em Campo Grande



Fonte: Dados obtidos em OPEN ENERGY INFORMATION, 2017.

Figura 9 - Frequência acumulada dos valores de DNI para Campo Grande



Fonte: Dados obtidos em OPEN ENERGY INFORMATION, 2017.

Considera-se que o campo solar com os concentradores se encontra paralelos ao solo e orientado na direção norte-sul, isto é, os valores de  $\beta$  e  $\gamma$  são iguais a zero. Além disso, os cálculos serão realizados para o meio-dia solar, onde a água de alimentação da caldeira será pré-aquecida até  $300,1^\circ\text{C}$  e o valor do DNI é de  $867,3 \text{ W/m}^2$ . Outra consideração a ser feita é de que as condições da caldeira não se alteram com o aumento da temperatura de entrada da água de alimentação. Assim, a área de projeto do campo solar é apresentada através da equação 10.

$$A_{cs} = \frac{\dot{Q}_{solar}}{DNI_p \cdot \eta_{opt} - Q_{perdas}} \quad (10)$$

Onde,

$A_{cs}$  = área do campo solar;

$\dot{Q}_{solar}$  = ganho de energia pela radiação solar;

$DNI_p$  = *Direct Normal Irradiance* de projeto;

$\eta_{opt}$  = eficiência óptica do coletor solar;

$Q_{perdas}$  = perdas térmicas do coletor solar.

A eficiência óptica baseia-se nas perdas por efeito cosseno, bloqueio dos raios do Sol e sombreamento dos coletores, e está relacionado ao modelo selecionado do fornecedor. Para esse estudo, são considerados os parâmetros do modelo Nova-1 que utiliza a tecnologia linear Fresnel da empresa alemã Novatec Solar.

Os valores fornecidos pelo fabricante para eficiência óptica são encontrados através de  $\eta_{opt} = 0,67 \cdot K_I \cdot K_{II}$  e os termos de  $K_I$  e  $K_{II}$  são multiplicadores em função dos ângulos de incidência transversal e longitudinal. Para o caso proposto, esses termos ( $K_I$  e  $K_{II}$ ) possuem o valor de 1,00, dessa forma, a eficiência é representada por  $\eta_{opt} = 0,67$ .

O calor útil ( $\dot{Q}_{solar}$ ) absorvido pelo campo solar e seu equacionamento está apresentado através da equação 11.

$$\dot{Q}_{solar} = \dot{m}(h_s - h_e) \quad (11)$$

Onde,

$\dot{m}$  é a vazão de água que será pré-aquecida [kg/s];

$(h_s - h_e)$  é a diferença de entalpias entre a entrada e a saída do campo de coletores solares.

O fornecedor do modelo adotado (Nova-1) também apresenta o equacionamento para a perda térmica do coletor, conforme é apresentado pela equação 12.

$$Q_{perdas} = u_1 \cdot \Delta T_{solar} + u_2 \cdot \Delta T_{solar}^2 \quad (12)$$

$$u_1 = 0,056 \left( \frac{W}{m^2 \cdot k} \right)$$

$$u_2 = 0,000213 \left( \frac{W}{m^2 \cdot k} \right)$$

Sendo que, os termos  $u_1$  e  $u_2$  são coeficientes fornecidos pelo modelo, e o  $\Delta T_{solar}$  é definido em função das temperaturas de entrada e saída do campo solar e da temperatura ambiente.

$$\Delta T_{solar} = \frac{T_{saída} + T_{entrada}}{2} - T_{amb} \quad (13)$$

O primeiro ponto de projeto definido foi o valor de 863,7 w/m<sup>2</sup> do DNI<sub>p</sub> e, uma vez considerado esse valor, pode-se determinar a área dos coletores para a operação do projeto. Porém, essa consideração subdimensiona o projeto e deve ser encontrado um fator de correção para determinar o melhor ponto, esse fator é o Múltiplo Solar (MS).

Para o primeiro cálculo de projeto, o valor de MS é de 1,0, o qual resultará na área de referência do campo solar, dessa forma, adotando a variação do MS, pode-se realizar comparações nos pontos de projeto para condições ótimas do sistema. O Múltiplo Solar pode se relacionar com a área campo solar, calor útil do campo, fração solar, custo de combustível e etc, e é determinado pela equação 14.

$$A_{cs} = MS \cdot \frac{\dot{Q}_{solar}}{DNI_p \cdot \eta_{opt} - Q_{perdas}} \quad (14)$$

A Fração Solar (FS) é a razão entre a energia térmica total gerada apenas pelo campo solar e a energia térmica gerada por todo o sistema, isto é, a parcela de calor que é entregue ao fluido pela ação do coletor solar. Para sistemas híbridos (solar/biomassa), faz-se necessário encontrar o valor da Fração Solar (FS) e pode ser feito através da equação 15.

$$FS = \frac{\dot{Q}_{solar}}{\dot{Q}_{solar} + \dot{Q}_{cald}} \quad (15)$$

## 4 SISTEMA HÍBRIDO BIOMASSA/SOLAR

### 4.1 COGERAÇÃO

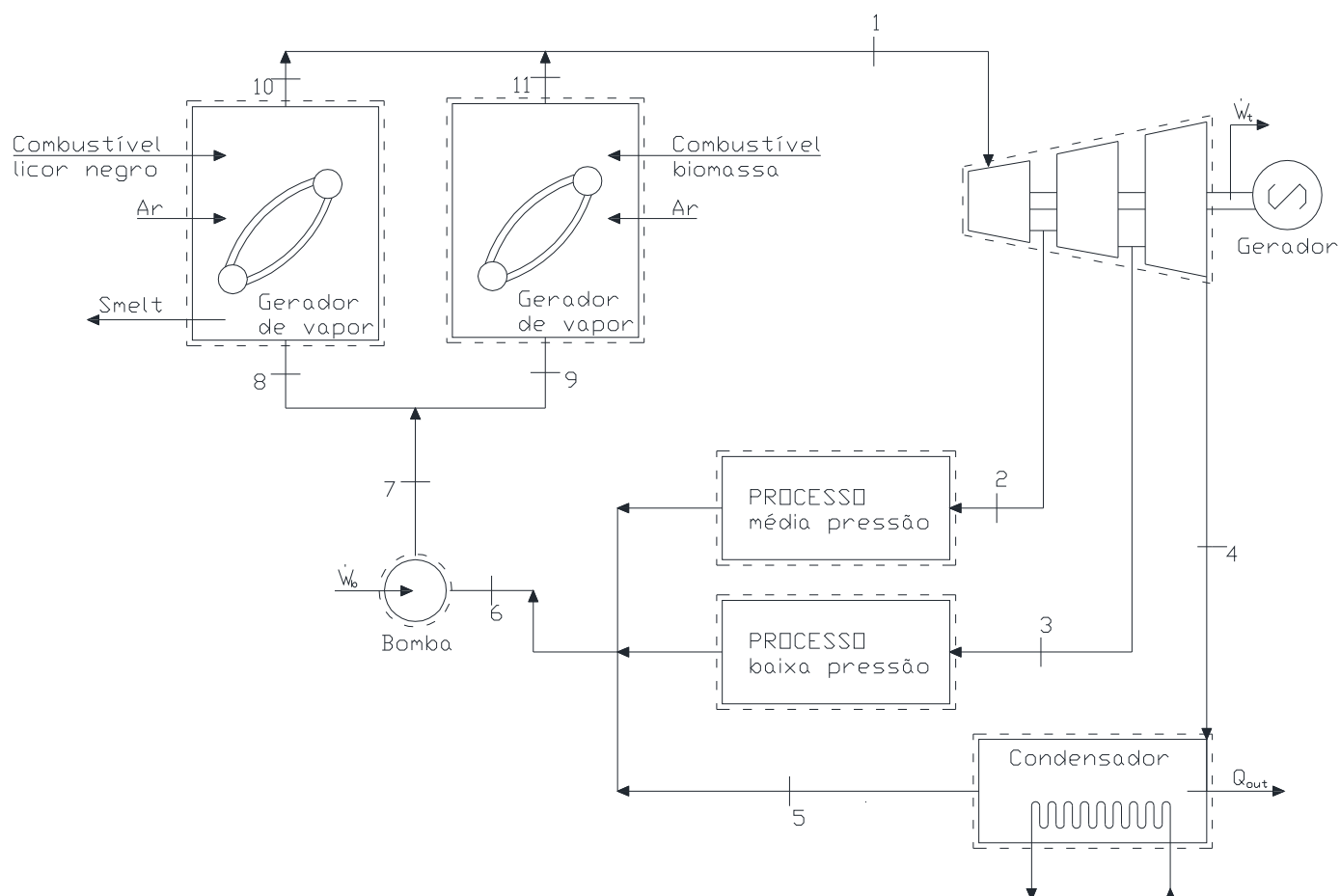
A indústria estudada para elaborar o projeto de hibridização é do setor de papel e celulose que tem como matéria-prima cavacos de eucalipto e como produto a celulose de fibra curta. A indústria se localiza na cidade de Três Lagos/MS e é composta por duas caldeiras que operam nas mesmas condições para geração de vapor superaquecido.

O vapor gerado pelas duas caldeiras alimenta uma turbina a vapor de extração-condensação, que possui duas extrações uma à 1,28 MPa e outra à 0,46 MPa, a turbina se expande até atingir a pressão de 0,3 MPa. Dessa forma, atende-se a linha de produção à média e baixa pressão, além da geração de eletricidade.

A figura 10 apresenta a esquematização do ciclo de cogeração apresentado pela indústria sendo que, os pontos 2 e 3 representam as entradas do vapor para o processo produtivo em diferentes pressões. Considera-se que todo o vapor demandado pelos processos retorna ao ciclo, passando por uma etapa de bombeamento até as caldeiras do sistema.

Os cálculos foram realizados através do equacionamento e com auxílio de tabelas termodinâmicas, assim, os pontos de entradas e saídas de cada processo pode ser determinado.

Figura 10 - Ciclo proposto da configuração atual



Fonte: O autor.

Com o auxílio do EES (*Engineering Equation Solver*) foram calculados os pontos termodinâmicos do ciclo apresentado pela figura 10. Este software possui um banco de dados de propriedades termodinâmicas para diferentes substâncias possibilitando a sua utilização na resolução das equações de um ciclo de potência.

### Caldeira de biomassa e de recuperação química

À partir de dados industriais, sabe-se que, ambas as caldeiras operam na pressão de 8,6 MPa e na temperatura de 760 K. A vazão mássica de licor negro (combustível) na caldeira de recuperação química é de 67,1 kg/s. As caldeiras possuem eficiência isentrópica ( $\eta_{cald,iso}$ ) de 85% (MORAN *et al*, 2013).

Segundo Ramos (2014) existe uma relação industrial na utilização da caldeira auxiliar de biomassa representada pela equação 16, isto é, o vapor superaquecido

gerado pela caldeira de biomassa constitui em torno de 14,6% aproximadamente do vapor superaquecido gerado pela caldeira de recuperação química.

$$\dot{m}_{v\_bio} = \dot{m}_{v\_LN} * 0,146 \quad (16)$$

Sendo que,

$\dot{m}_{v\_bio}$  = vazão mássica do vapor superaquecido gerado pela caldeira de biomassa;

$\dot{m}_{v\_LN}$  = vazão mássica do vapor superaquecido gerado pela caldeira de recuperação química.

Os outros cálculos estão representados através das equações 17 e 18.

$$\eta_{cald,iso} = \frac{\dot{m}_{v\_LN} * (h_s - h_e)}{\dot{m}_{LN} * PCI_{LN}} \quad (17)$$

$$\eta_{cald,iso} = \frac{\dot{m}_{v\_bio} * (h_s - h_e)}{\dot{m}_{bio} * PCI_{bio}} \quad (18)$$

Sendo que,

$\eta_{cald,iso}$  = eficiência isentrópica da caldeira;

$\dot{m}_{LN}$  = vazão mássica de licor negro;

$PCI_{LN}$  = PCI (*Poder Calorífico Inferior*) do licor negro;

$\dot{m}_{bio}$  = vazão mássica de biomassa;

$PCI_{bio}$  = PCI (*Poder Calorífico Inferior*) de biomassa.

### **Turbina**

As vazões de vapor demandadas pelos processos, a média e baixa pressão (28,40 kg/s e 135,83 kg/s, respectivamente), foram consideradas segundo Ramos *et al* (2014). Os processos de média e baixa pressão demandam vapor, respectivamente, à  $P = 1,28$  MPa e  $T = 253,4$  °C (526,4 K),  $P = 0,46$  MPa e  $T = 157,1$  °C (430,1 K). A eficiência isentrópica da turbina ( $\eta_{turb,iso}$ ) considerada é de 83% (MORAN *et al*, 2013). O equacionamento desse equipamento está representado nas equações seguintes.



$$\eta_{turb,iso} = \frac{h_e - h_s}{h_e - h_{s,iso}} \quad (19)$$

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (20)$$

### Condensador

O condensador opera na mesma pressão da última extração da turbina e funciona semelhante à um trocador de calor com o intuito de condensar o fluido resultante da turbina.

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{cond} * (h_e - h_s) \quad (21)$$

Sendo que,

$\dot{Q}_{cond}$  = fluxo de calor no condensador

### Bomba

A eficiência isentrópica da bomba ( $\eta_{bomba,iso}$ ) é de 85% (MORAN *et al*, 2013) e ela opera na mesma pressão da caldeira. Sua funcionalidade é bombear a água condensada nos parâmetros da entrada das caldeiras e, para evitar problemas mecânicos no equipamento, a entrada de fluido na bomba deve ser no estado líquido. O equacionamento da bomba está apresentado pela equação 22.

$$\eta_{bomba,iso} = \frac{h_{s,iso} - h_e}{h_s - h_e} \quad (22)$$

### Eficiência do ciclo

A eficiência pode ser calculada através da razão entre o trabalho útil fornecido pelo ganho de calor necessário para a conversão de energia, ou seja, indica o quanto da energia fornecida ao ciclo está sendo transformada em trabalho. A eficiência energética do ciclo e esse parâmetro pode ser obtido a partir da equação 7 e o seu desenvolvimento está a seguir.

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{ciclo}}{\dot{Q}_{cald}} = \frac{\dot{W}_{turb} - \dot{W}_{bomba}}{\dot{Q}_{cald}}$$

$$\eta_I = \frac{\dot{m}_1(h_1 - h_2) + \dot{m}_2(h_2 - h_3) + \dot{m}_3(h_3 - h_4) - \dot{m}_6(h_7 - h_6)}{\dot{m}_8(h_{10} - h_8) + \dot{m}_9(h_{11} - h_9)}$$

$$\eta_I = 0,2139 = 21,4\%$$

Considerando um gerador com eficiência de 90%, a potência gerada é de 169,96 MWh e, admitindo que o consumo da indústria seja de 88 MWh (dados industriais), a geração excedente de eletricidade é de 81,96 MWh.

Com o auxílio do *software* EES e do equacionamento apresentado acima, foram calculados os parâmetros da configuração industrial atual e a tabela 1 apresenta os resultados dos cálculos para este ciclo.

Tabela 1 - Propriedades do ciclo termodinâmico da configuração atual

Pontos	Fase do fluido	P (MPa)	T (K)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	$\dot{m}$ (kg/s)
1	Vapor superaquecido	8,60	760,0	3358,0	6,641	315,18
2	Vapor superaquecido	1,28	526,4	2939,7	6,810	28,40
3	Vapor superaquecido	0,46	430,1	2764,0	6,894	135,83
4	Vapor superaquecido	0,30	406,5	2698,4	6,927	150,95
5	Mistura	0,30	406,5	561,6	1,672	150,95
6	Líquido saturado	0,27	403,0	546,2	1,634	315,18
7	Líquido comprimido	8,60	404,2	557,0	1,639	315,18
8	Líquido comprimido	8,60	404,2	557,0	1,639	275,03
9	Líquido comprimido	8,60	404,2	557,0	1,639	40,15
10	Vapor superaquecido	8,60	760,0	3358,0	6,641	275,03
11	Vapor superaquecido	8,60	760,0	3358,0	6,641	40,15

Fonte: O autor.

## 4.2 HIBRIDIZAÇÃO

As condições de parâmetro e desempenho da configuração atual mantêm-se constantes para o projeto de hibridização. O campo solar será adicionado para aumentar a temperatura de entrada da água de alimentação da caldeira até a temperatura de saturação na pressão de operação 300,1°C (573,1 K). Analisando o campo solar como volume de controle, ele assemelha-se ao de um trocador de calor,

então o equacionamento para o ganho de energia está representado pela equação 11.

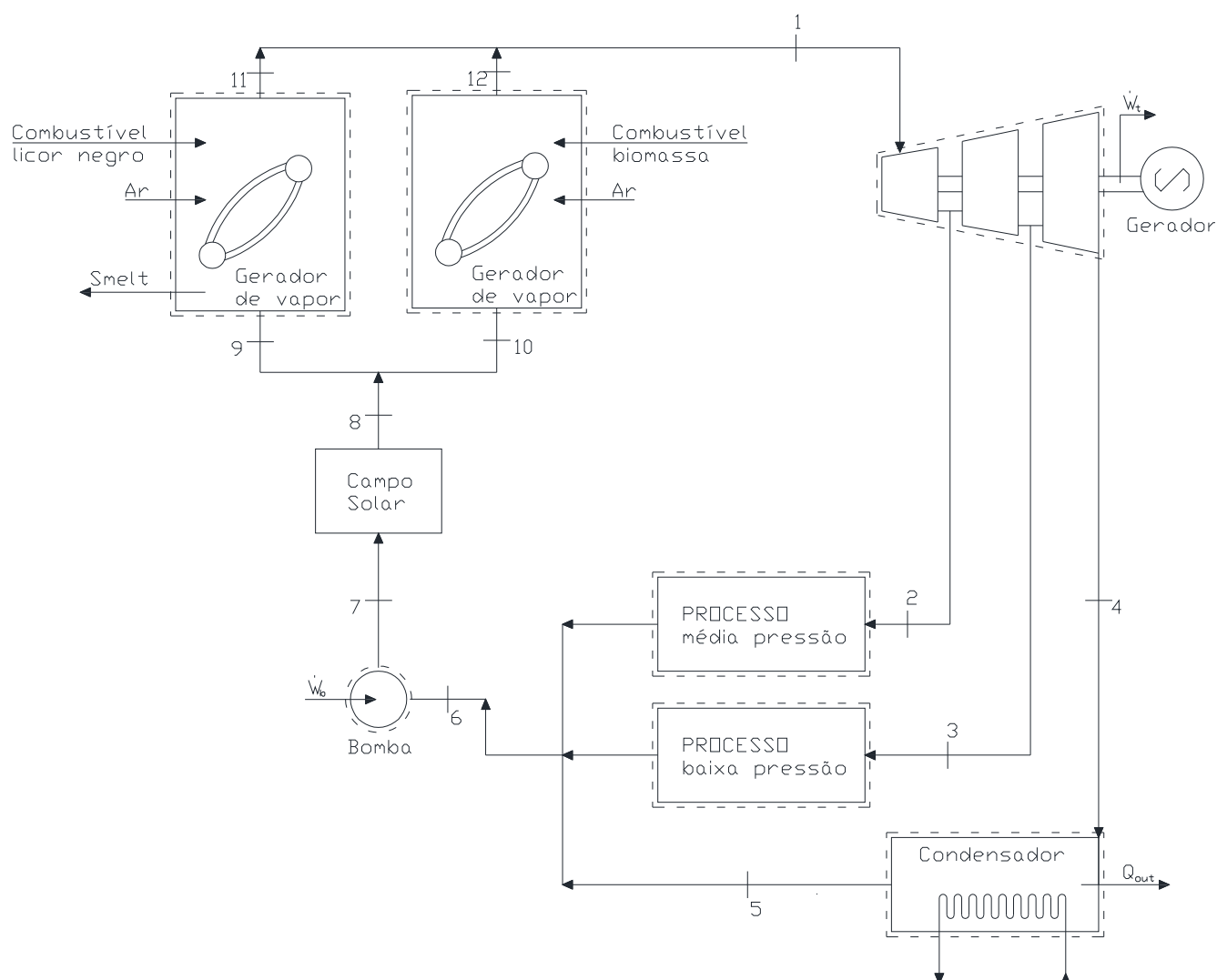
A tabela 2 são os resultados calculados referente a configuração com hibridização da planta industrial. Os cálculos foram através do *software* EES e o equacionamento está apresentado nos capítulos 3 e 4 desse trabalho. A figura 11 representa esquematicamente a nova configuração do ciclo.

Tabela 2. Propriedades do ciclo termodinâmico da configuração com hibridização

<b>Pontos</b>	<b>Fase do fluido</b>	<b>P (MPa)</b>	<b>T (K)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kgK)</b>	<b><math>\dot{m}</math> (kg/s)</b>
<b>1</b>	Vapor superaquecido	8,60	760,0	3358,0	6,641	315,18
<b>2</b>	Vapor superaquecido	1,28	526,4	2939,7	6,810	28,40
<b>3</b>	Vapor superaquecido	0,46	430,1	2764,0	6,894	135,83
<b>4</b>	Vapor superaquecido	0,30	406,5	2698,4	6,927	150,95
<b>5</b>	Mistura	0,30	406,5	561,6	1,672	150,95
<b>6</b>	Líquido saturado	0,27	403,0	546,2	1,634	315,18
<b>7</b>	Líquido saturado	8,60	404,2	557,0	1,639	315,18
<b>8</b>	Vapor saturado	8,60	573,1	2748,0	5,703	315,18
<b>9</b>	Vapor saturado	8,60	573,1	2748,0	5,703	275,03
<b>10</b>	Vapor saturado	8,60	573,1	2748,0	5,703	40,15
<b>11</b>	Vapor superaquecido	8,60	760,0	3358,0	6,641	275,03
<b>12</b>	Vapor superaquecido	8,60	760,0	3358,0	6,641	40,15

Fonte: O autor.

Figura 11 - Ciclo proposto da configuração com hibridização



Fonte: O autor.

Como visto através das figuras 8 e 9, o  $DNI_p$  foi arbitrado no valor de  $867,3 \text{ W/m}^2$  e, através do fornecedor do coletor solar Fresnel, considerou-se a eficiência óptica de 0,67. As perdas térmicas foram calculadas através da equação 12 e o ganho solar através da equação 11. A área do coletor é calculada utilizando a equação 14 considerando o múltiplo solar de 1,0; e a fração solar é encontrado pela equação 15.

A tabela 3 apresenta os dados calculados através do equacionamento apresentado para a área projetada dos coletores solar mantendo as condições. A eficiência global do ciclo manteve-se em 21,4%.

Tabela 3 - Dados utilizados para calcular a área do campo solar

<b>DNIp [W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Eficiência óptica</b>	<b>Perdas térmicas</b>	<b>Ganho solar [MW]</b>	<b>Múltiplo solar</b>	<b>Área coletor [ha]</b>	<b>Fator Solar</b>
867,3	0,67	18,42	690,76	1,0	122,8	0,782

Fonte: O autor.

O campo solar pode ter diversos objetivos no planejamento de um projeto de hibridização. Neste trabalho, os coletores têm a finalidade de contribuir na economia do consumo dos dois combustíveis (cavaco e licor negro) utilizados nas caldeiras da indústria. Considerando os mesmos parâmetros para as caldeiras, inclusive suas eficiências, obteve-se a economia de 78,22% do licor negro e 79,83% da biomassa (cavaco) após a hibridização da planta – ver tabela 4. Isso se deve ao fato da fração solar ser de 0,782, isto é, quase 80% da energia térmica cedida ao fluido de trabalho é proveniente da energia solar provida dos concentradores solares.

A fração solar é influenciada pelos requisitos admitidos nesse projeto, sendo a temperatura de saída do campo solar como um dos principais influenciadores para os cálculos. Adotou-se que o fluido resultante do campo solar estaria em condições de vapor saturado para contribuir com a demanda de energia exigida na caldeira. O salto entálpico ou a troca de energia no campo solar é muito maior em comparação com a caldeira. Dessa forma, a parcela de energia atribuída pela radiação solar é maior do que a energia gerada pela queima dos combustíveis dentro das respectivas caldeiras.

Tabela 4 - Parâmetros das caldeiras da configuração atual

<b>Combustível</b>	<b>Configuração Atual</b>	<b>Hibridização</b>	<b>Economia</b>
	<b>Vazão do combustível [kg/s]</b>	<b>Vazão do combustível [kg/s]</b>	
<b>Licor negro</b>	67,10	14,61	78,22 %
<b>Biomassa</b>	11,85	2,39	79,83%

Fonte: O autor.

Esses resultados são específicos para atender as condições da planta industrial em seu processo e na geração de energia elétrica com o ciclo atual. Outras configurações podem ser apresentadas variando a quantidade de energia térmica que o campo solar oferece ao fluido, além disso, pode-se avaliar a redução do consumo de combustível até que seja necessário apenas um combustível para geração de energia no ciclo.

## 5 CONCLUSÃO

O trabalho elaborou um projeto de hibridização em uma indústria de celulose situada na cidade de Três Lagoas/MS. O projeto estuda a implantação de um sistema termossolar com a utilização de coletores do tipo linear Fresnel para aquecimento de água de alimentação que atendem as caldeias de biomassa e licor negro na planta industrial.

A indústria de celulose possui duas caldeiras que funcionam concomitantemente, sendo uma que utiliza o licor negro como combustível e outra auxiliar que possui o cavaco da madeira como combustível. A economia desses combustíveis significa em ganhos energéticos e financeiros para a empresa que implementa esse projeto.

O modelo atual de cogeração foi apresentado e demonstra que a indústria produz excedente de vapor para geração de eletricidade com a capacidade de gerar 81,96 MWh que pode ser maior com novos projetos de eficiência energética.

As tecnologias termossolares são propostas antigas conhecidas na sociedade, porém, sua utilização em grande escala como usinas solares estão se tornando realidade recentemente. Alguns países possuem incentivos governamentais para utilizar esse tipo de energia e conseguem desenvolver e aplicar projetos significantes dentre outros da mesma área. Porém, para o Brasil, os estudos estão relacionados com a hibridização de plantas industriais, onde os coletores solares funcionam paralelamente com geradores de vapor.

O modelo de projeto analisou apenas o múltiplo solar equivalente a 1 e obteve a economia no consumo de combustível de 78,22% do licor negro e 79,83% da biomassa (cavaco) após a hibridização da planta. A área calculada para atender essa demanda foi de 122,8 hectares de coletores solares do tipo Fresnel. A eficiência global da planta se manteve constante em 21,4%.

Outras configurações podem ser analisadas a partir desse estudo. A temperatura de saída do campo solar é um dos maiores influenciadores nos resultados obtidos pela engenharia. Pode-se adotar valores diferentes para o pré-aquecimento da água de alimentação da caldeira. Além disso, o campo solar pode ser projetado para atuar paralelamente às caldeiras gerando vapor superaquecido para a turbina. Nessa última configuração, a variação da fração solar é muito importante para

saber a quantidade de energia será proveniente do campo solar, já que, ele será um equipamento distinto da caldeira.

A implementação de projetos de hibridização utilizando as tecnologias termossolares possuem diversas disposições para o campo dos coletores dependendo da finalidade do projeto. Os resultados trazem ganhos na eficiência energética e é necessário realizar a análise econômica para eleger a viabilidade dessa nova tecnologia. O licor negro, que é o combustível da indústria analisada, tem alto valor agregado na sua venda para substituir derivados de petróleo em indústrias e segmentos diversos. Então, um estudo mais aprofundado da hibridização dessas plantas, faz-se necessário para economizar a utilização desse combustível.



## REFERÊNCIAS

BLANC, P., ESPINAR, B., GEUDER, N., GUEYMARD, C., MEYER, R., PITZ-PAAL, R., REINHARDT, B., RENNÉ, D., SENGUPTA, M., WALD, L., WILBERT, S. Direct Normal Irradiance Related Definitions and Applications: The Circumsolar Issue. **Solar Energy**, [S.l.], v. 110, p.561-577, dez. 2014.

BRASIL. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **NR 13: Caldeiras e Vasão de Pressão**, 2014.

BEJAN, A. **Advanced Engineering Thermodynamics**. 3 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

BURIN, E. L. K., **Plantas de Cogeração do Setor Sucroalcooleiro Assistidas por Concentradores Parabólicos**. 2015. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

CSP WORLD. **CSP World Map**. Julho de 2017. Disponível em: <<http://cspworld.org/cspworldmap>>.

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. John Wiley & Sons, INC. 4ª ed. 2013.

ELEKTRO - Eletricidade e Serviços (Org.). **Manuais Elektro de Eficiência Energética**. Brasília: Eletrobrás, 2008.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2016: Ano base 2015**. Rio de Janeiro: EPE, 2016

FERREIRA, E. T. F. **Análise de Sistemas de Cogeração com Gaseificação de Licor Negro no Setor de Papel e Celulose**. 2008. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008

GALANTE, R. M. **Análise Termodinâmica de uma Planta Termoelétrica a Biomassa Assistida por Energia solar**. 2015. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ (Ed.). **Relatório Anual 2016**. Brasília: Studio 113, 2016.

INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9488: Solar energy - Vocabulary**. 1 ed. [S.l.: s.n.], 1999. 47 p.

KALOGIROU, Soteris A. Solar thermal collectors and applications. **Progress In Energy And Combustion Science**, [s.l.], v. 30, n. 3, p.231-295, jan. 2004

LUQUE, A., HEGEDUS, S. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003.

MARTINELLI JUNIOR, L. C. **Maquinas térmicas II**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul: Panambi, 2002.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, DAISIE D.; BAILEY, MARGARET B.; **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MORIN, G.; DERSCH, J.; PLATZER, W.; ECK, M.; HÄBERLE, A. Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector power plants. **Solar Energy**, v. 86, n. 1, p. 1–12, jan. 2012.

OPEN ENERGY INFORMATION (OpenEI). **SWERA – Solar and Wind Energy Resource Assessment**. Julho de 2017. Disponível em <<https://openei.org/apps/SWERA/>>

PACHECO, J. D., CORREIA, M. A. C. **Análise Termodinâmica de Sistemas de Cogeração na Indústria de Celulose: Comparativo entre Queima e Gaseificação do Licor Negro**. 2015. 120 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2015.

PETERSEIM, J. H. et al. Hybridisation optimization of concentrating solar thermal and biomass power generation facilities. **Solar Energy**, [s.l.], v. 99, p.203-214, jan. 2014[a]

PETERSEIM, J. H., WHITE S., TADROS, A., HELLWIG U. Concentrating solar power hybrid plants – Enabling cost effective synergies. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 67, p.178-185, jul. 2014[b].

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (Org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2014. 529 p.

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S. L., RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. 60 p.

RAMOS, R. A. V.; PEREIRA, F. R.; ALMEIDA, A. A. R. de; SCARPIN, L. M.; VANCINE JUNIOR, C. **Avaliação Termodinâmica e Econômica do Sistema de Cogeração de Energia de uma Empresa Produtora de Celulose**. In: 9 CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 2014, São Paulo. Anais do 9 Congresso Internacional de Bioenergia, 2014. p. 1 - 9.

RESTREPO, J. C. L. **Avaliação de uma Planta de Cogeração Assistida por Concentradores Solares do tipo Linear Fresnel do Setor Sucrialcooleiro**. 2014. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

RIBEIRO, B. B. **Geração de Vapor Superaquecido em Campo de Concentradores Fresnel para Hibridização de Gerador a Vapor a Bagaço de Cana-de-Açúcar**. 2015. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

ROJAS, E. **Energia Solar Térmica**: Programa de Capacitação em Energias Renováveis. [S.l: s. n.], 2013. 68 p.

SÁ, A. B. de. **Procedimento para Modelagem de uma Planta Termossolar Utilizando a Tecnologia de Coletores Cilindro Parabólicos**. 2013. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SANTOS, F. B. dos; NOVO, L. M. A. **Fundamentos Teóricos Relacionados à Cogeração e o Exemplo da Central de Cogeração Infoglobo**. 2008. 176 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SOLAR ENERGY INDUSTRIES ASSOCIATION. **Concentrating Solar Power**. Julho de 2017. Disponível em: <<http://www.seia.org/policy/solar-technology/concentrating-solar-power>>.

SOLARPACES - SOLAR POWER AND CHEMICAL ENERGY SYSTEMS. **CSP Projects Around the World**. Julho de 2017. Disponível em: <<http://www.solarpaces.org/csp-technology/csp-projects-around-theworld>>.

SORIA, R., PEREIRA-PORTUGAL, J., SZKLO, A., MILANI, R., SCHAEFFER, R. Hybrid concentrated solar power (CSP)–biomass plants in a semiarid region: A strategy for CSP deployment in Brazil. **Energy Policy**, [s.l.], v. 86, p.57-72, nov. 2015.