



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA**



RENAN TADEU MAIA POSWAR

**ANÁLISE TÉCNICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO USANDO BIOMASSA
E ENERGIA SOLAR PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE**

OURO PRETO - MG

2022

RENAN TADEU MAIA POSWAR

renan.poswar@aluno.ufop.edu.br

**ANÁLISE TÉCNICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO USANDO BIOMASSA
E ENERGIA SOLAR PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Elisângela Martins Leal

**OURO PRETO – MG
2022**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P857a Poswar, Renan Tadeu Maia.

Análise técnica de um sistema híbrido usando biomassa e energia solar para geração de eletricidade. [manuscrito] / Renan Tadeu Maia Poswar. - 2022.

55 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Elisângela Martins Leal.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Energia. 2. Energia heliotérmica. 3. Biomassa. 4. Bagaço-de-cana. 5. Resíduos Sólidos - Urbano. I. Leal, Elisângela Martins. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU



FOLHA DE APROVAÇÃO

Renan Tadeu Maia Poswar

Análise Técnica De Um Sistema Híbrido Usando Biomassa E Energia Solar Para Geração De Eletricidade

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 15 de junho de 2022

Membros da banca

D.Sc. Elisângela Martins Leal - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
D.Sc. Luís Antônio Bortolaia - Universidade Federal de Ouro Preto
D.Sc. Edson Alves Figueira Junior - Universidade Federal de Ouro Preto

Elisângela Martins Leal, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/06/2022



Documento assinado eletronicamente por **Elisangela Martins Leal, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/06/2022, às 10:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0345794** e o código CRC **8CEC8313**.

Dedico à Deus por mais essa etapa vencida e à minha mãe, pelo apoio, paciência e por ser o exemplo. À toda minha família pela amizade, amor e companheirismo incondicionais.

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a beleza libertadora do intelecto para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer”.

Albert Einstein

RESUMO

POSWAR, Renan Tadeu Maia. Análise técnica de um sistema híbrido usando biomassa e energia solar para geração de eletricidade. 2022. 56 páginas. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

O presente trabalho trata de um estudo de caso sobre a redução de consumo de combustível em uma caldeira, utilizando a energia solar térmica concentrada para pré-aquecer a água de alimentação da caldeira. Estuda-se a geração de energia pela queima do bagaço-de-cana na cidade de Natal e por Resíduos Sólidos Urbanos na cidade de Fortaleza. Proporcionar uma redução de consumo de combustível pode contribuir na redução de custos e emissão de gases nocivos na atmosfera, gerando energia elétrica em uma termelétrica. O estudo baseia-se em uma caldeira *Pin Hole*, que pode ser usada para os dois tipos de combustível, e o coletor solar *Eurotrough* ET100. Após a coleta de dados como a irradiação solar incidente em cada cidade, a produção e o poder calorífico inferior da biomassa disponível, dimensiona-se a área necessária para elevar a temperatura da água de alimentação de 100°C para 200°C. O resultado é comparado com um ciclo base sem os coletores. O consumo de combustível diminui em 13 t/h para a cidade de Natal e 15 t/h para a cidade de Fortaleza, considerando o horário de maior incidência solar. Conclui-se que usar coletores solar é uma forma eficiente de reduzir o consumo de combustível de uma caldeira à biomassa, podendo trazer grandes benefícios para a geração de energia elétrica.

Palavras-chave: Energia. Energia Solar Térmica Concentrada. Biomassa. Bagaço-de-cana. Resíduos Sólidos Urbanos.

ABSTRACT

POSWAR, Renan Tadeu Maia. Technical analysis of a hybrid system using biomass and solar energy for electricity generation. Monograph (Bachelor in Mechanical Engineering). School of Mining, Federal University of Ouro Preto. 52 pages. 2022

The present work is a case study of the fuel consumption reduction in a boiler, using concentrated solar thermal energy to preheat the boiler feed water. The energy generation by sugarcane bagasse in the city of Natal and by municipal solid waste in the city of Fortaleza is studied. The reduction in fuel consumption can contribute to reduce costs and emission of pollutant gases into the atmosphere, generating an impact on the form of electricity generation in a thermoelectric plant. The study is based on a Pin Hole boiler, which can be used for both types of fuel, and Eurotrouegh ET100 solar collectors. After collecting data such as the incident solar irradiation in each city, the available biomass production and lower heating value, the area needed to raise the temperature of the feed water from 100°C to 200°C is sized and the result is compared with a base cycle without the collectors. Fuel consumption decrease by 13 ton/hour in the city of Natal and 15 ton/hour in Fortaleza, considering the time of the highest solar incidence. It is concluded that using solar collectors is an efficient way to reduce the fuel consumption of a biomass boiler, which can bring great benefits to the electricity generation.

Keywords: Energy, Concentrated Thermal Solar Energy, Biomass, Sugarcane Bagasse, Solid Urban Waste

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Oferta Interna de energia elétrica por fonte - Ano-Base 2020.....	1
Figura 2: Produtividade de Energia Primária desde 1970 até 2020.	6
Figura 3: Energia Química nas reações de combustão.....	7
Figura 4: Representação do Sistema Interligado Nacional (SIN).....	9
Figura 5: Variabilidade do foto período ao longo do ano para diferentes latitudes.	11
Figura 6: Geometria Sol-Terra, estações do ano e a duração do dia.	11
Figura 7: Ângulos notáveis em solarimetria.....	12
Figura 8: Amplitude de valores do ângulo de declinação.	13
Figura 9: Mapa do total anual de irradiação solar direta normal.....	15
Figura 10: Coletores solares parabólicos.....	16
Figura 11: Diagrama esquemático do coletor.....	16
Figura 12: Componentes principais do concentrador cilíndrico-parabólico.	17
Figura 13: Campos de produção de cana-de-açúcar e mapa de irradiação horizontal global (GHI).	18
Figura 14: Briquetes em forma de bolacha e tarugos.	19
Figura 16: Fluxograma de atividades do presente trabalho.....	29
Figura 17: Irradiação solar no Plano Horizontal próximo a Natal/RN.....	33
Figura 18: Irradiação solar no Plano Horizontal próximo a Fortaleza/CE.....	35
Figura 19: Caldeira <i>Pin Hole</i>	37
Figura 20: Ciclo Rankine Simples: Cenário Base.....	38
Figura 21: Ciclo Rankine com pré-aquecimento por coletores solares.....	39
Figura 22: Potências térmicas da caldeira e dos coletores solares.	42
Figura 23: Consumo de combustível e Eficiência dos ciclos.....	43
Figura 24: Potências térmicas da caldeira e dos coletores solares na cidade de Fortaleza.....	46
Figura 25: Consumo de combustível e Eficiência dos ciclos na cidade de Fortaleza.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar	20
Tabela 2: Variáveis e Indicadores de Pesquisa.....	31
Tabela 3: Poder Calorífico dos materiais encontrados nos Resíduos Sólidos Urbanos	36
Tabela 4: Dados do coletor solar	40
Tabela 5: Dados para análise energética dos ciclos para a cidade de Natal a partir do bagaço-de-cana.....	42
Tabela 6: Dados para análise energética dos ciclos para a cidade de Fortaleza a partir do RSU	45
Tabela 7: Comparação de resultados entre as cidades de Natal e Fortaleza.....	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Energia.....	5
2.2	Energia Solar Térmica Concentrada.....	10
2.3	Biomassa.....	17
2.4	Análise termodinâmica do ciclo híbrido.....	21
2.4.1	Coletor Solar.....	23
2.4.2	Turbina	23
2.4.3	Trocador de calor.....	24
2.4.4	Bomba.....	25
2.4.5	Caldeira.....	25
2.4.6	Condensador	26
2.5	Considerações finais	26
3	METODOLOGIA.....	28
3.1	Tipo de Pesquisa.....	28
3.2	Materiais e Métodos	29
3.3	Variáveis e Indicadores	30
3.4	Instrumento de coleta de dados	31
3.5	Tabulação de dados	31
3.6	Considerações Finais do capítulo	32
4	RESULTADOS.....	33
4.1	Delimitação das áreas em estudo.....	33
4.2	Resultado da análise energética dos ciclos propostos	36
4.2.1	Bagaço-de-cana em Natal/RN	40
4.2.2	Resíduos Sólidos Urbanos em Fortaleza/CE.....	44

4.3	Comparação	47
5	CONCLUSÕES E RECOMENÇÕES	49
5.1	Conclusões.....	49
5.2	Recomendações	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo é apresentado uma abordagem teórica e global sobre o aproveitamento da energia solar para uma usina híbrida, utilizando biomassa na geração de energia, a partir da sua incineração em uma caldeira. Além disso, é contextualizado o problema abordado através do conceito e análise de viabilidade de um ciclo Rankine para a geração de energia. Sendo assim, o primeiro capítulo tem a finalidade de apresentar o problema, os motivos de sua origem, justificativas para realização, os objetivos e estrutura do trabalho.

1.1 Formulação do Problema

A energia tem papel fundamental no desenvolvimento da humanidade, nos auxiliando em várias tarefas do cotidiano. A busca por uma sustentabilidade em nossa evolução requer estudos sobre geração de energia que causam menos impacto no meio ambiente, sendo necessário estudos multidisciplinares envolvendo tecnologia, economia, sociedade, política e meio ambiente (REIS, 2011).

A Figura 1 apresenta a estrutura de oferta interna de energia elétrica no país, em 2020.

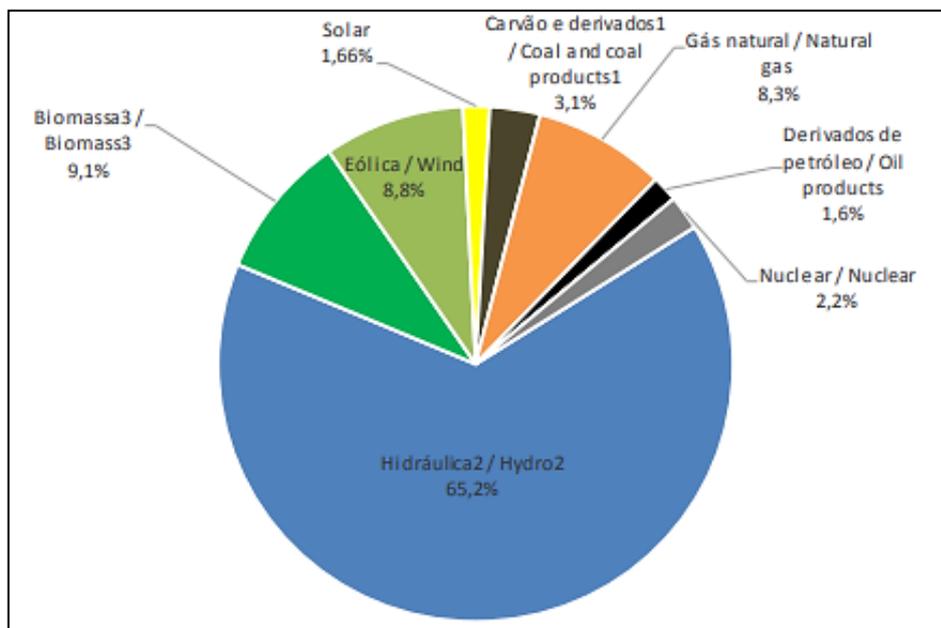


Figura 1: Oferta Interna de energia elétrica por fonte - Ano-Base 2020.
Fonte: EPE, 2021

Conforme a Figura 1, a matriz elétrica brasileira é predominantemente renovável, fruto de grande fatia de geração hidráulica (65,2%), da geração térmica originada por biomassa (9,1%), da geração eólica (8,8%) e da energia solar (1,66%). Com isso, afirma-se que

aproximadamente 85% da geração elétrica no Brasil é originada a partir de fontes renováveis (EPE, 2021).

A transformação de energia solar térmica em energia elétrica é similar a geração de energia em termelétricas convencionais. Para isso, utiliza-se espelhos que captam a energia do sol e reflete em um receptor que circula o fluido de trabalho. O fluido é aquecido a temperaturas elevadas devido a concentração solar e posteriormente convertido em energia mecânica em uma turbina que, acoplada a um gerador, possibilita a geração de energia elétrica (LODI, 2011). Esse sistema pode ser híbrido, sendo utilizado queima de biomassa como uma das fontes para o aquecimento do fluido de trabalho.

De acordo com Lodi (2011), a tecnologia de concentração solar térmica, internacionalmente conhecida como CSP (*Concentrated Solar Power*) é considerada madura internacionalmente, tendo as primeiras plantas comerciais entrando em operação na Califórnia (Estados Unidos – EUA) entre 1984 e 1991. Ainda segundo o mesmo autor, existem 4 conceitos de CSP: cilíndrico-parabólico, torre solar, disco parabólico e CLFR (Fresnel), sendo a tecnologia cilíndrico-parabólico a mais madura tecnologicamente, já possuindo milhares de horas de operação comprovada. A tecnologia CSP pode ser associada a uma fonte de biomassa, tornando mais barata a produção de energia em uma usina híbrida (LODI, 2011).

O Brasil possui um grande potencial para uso de biomassa devido ao seu extenso território e produções agrícolas que permite uma grande variedade de produção desse tipo de combustível para a geração de eletricidade. O ciclo de vida das plantas relativamente curto torna a biomassa uma boa alternativa para a diversificação da matriz energética brasileira (DOMINGUES, 2020).

Define-se biomassa como uma matéria orgânica de origem vegetal ou animal passível de ser transformada em energia térmica ou elétrica (ANEEL, 2008). A participação de renováveis na matriz energética teve como marca o aumento da oferta da biomassa de cana associada à redução de oferta das fontes não renováveis, segundo o Balanço Energético Nacional de 2021.

As usinas termelétricas brasileiras operam com diversas tecnologias e combustíveis, tendo os ciclos de potência mais utilizados comercialmente o ciclo Rankine, ciclo combinado e motor a combustão interna. Cada ciclo possui suas características e são apropriados para determinados combustíveis. No caso do uso da biomassa e da energia solar, o ciclo Rankine é o mais indicado (DOMINGUES, 2020).

Baseado em Ferreira (2006), o ciclo Rankine é identificado como um ciclo a vapor contendo uma caldeira, uma turbina, o condensador e uma bomba. Na sua forma de geração termelétrica, a caldeira é o componente que recebe a água de alimentação proveniente da bomba e fornece o vapor superaquecido necessário ao funcionamento da turbina. A turbina produz potência de eixo, que é usada pelo gerador para geração de eletricidade. O fluido que sai da turbina vai para o condensador, passando para a fase líquida, reiniciando o ciclo (FERREIRA, 2008). A água da caldeira pode ser aquecida utilizando coletores solares.

Neste cenário, chega-se a seguinte pergunta problema:

Qual a influência da inclusão de coletores solares no consumo de combustível de um ciclo híbrido para duas cidades do Brasil?

1.2 Justificativa

Como opção de diversificação da matriz energética brasileira, nota-se a importância de estudar a viabilidade de plantas híbridas para geração de energia. Com o estudo, é possível analisar vantagens e desvantagens desse tipo de projeto que é bastante complexo. Levando em consideração a grande capacidade de produção de biomassa e o potencial de energia solar, pode-se aproveitar as vantagens oferecidas. Utilizando a energia solar como complemento à biomassa, diminui a quantidade do combustível empregado nas termelétricas, obtém-se impactos ambiental, social e político.

Levando em consideração o aumento da demanda de energia, a necessidade de diversificar a geração e a capacidade do país de gerar energia através de fontes renováveis, surge a motivação do estudo. Os conceitos de engenharia mecânica visto ao longo do curso será aplicado para o desenvolvimento do trabalho, analisando as vantagens e desvantagens de realizar a produção de energia através de uma usina híbrida.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar tecnicamente um sistema híbrido usando biomassa e energia solar para geração de eletricidade aplicado a duas cidades brasileiras.

1.3.2 Específicos

- Realizar o levantamento bibliográfico sobre sistema híbrido, biomassa, energia solar, e análise termodinâmica;
- Descrever a metodologia adotada, apontar as variáveis e os indicadores do estudo e apresentar a instrumentação de coleta e tabulação dos dados obtidos;
- Avaliar a composição gravimétrica da biomassa de duas cidades brasileiras;
- Desenvolver, descrever e fundamentar o sistema híbrido proposto;
- Estimar a viabilidade técnica do uso da biomassa como combustível e do aquecimento da água através da energia solar térmica concentrada a ser entregue a turbina;
- Concluir e realizar sugestões para estudos futuros.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é desenvolvido em cinco capítulos, tendo como base o detalhamento do problema até a solução.

No capítulo 1 é apresentada uma breve introdução sobre o uso da biomassa e energia solar na geração de energia. Além disso, haverá a contextualização do problema abordado por meio do conceito e análise de viabilidade de um ciclo Rankine para este fim. Em seguida, no capítulo 2 é realizada a revisão bibliográfica acerca do tema a ser estudado, objetivando o levantamento das cidades a serem estudadas, das propriedades físico-químicas das biomassas, dos dados de operação de um ciclo Rankine e de um aquecedor solar. O capítulo 3 apresenta o processo metodológico adotado na pesquisa, bem como as ferramentas utilizadas para validação dos dados. No capítulo 4 são discutidos os resultados encontrados, analisados e comparados a teoria. Após a análise desses dados, é proposta a melhor configuração para o sistema. E por fim, o capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é abordada a revisão bibliográfica acerca da definição de energia, biomassa e sua classificação. Após, é feita uma abordagem sobre o processo de incineração de biomassa que opera baseado no ciclo Rankine, seguido de uma modelagem do mesmo. Para isso, são utilizadas informações existentes na literatura acadêmica, entre outras fontes.

2.1 Energia

De acordo com Haddad (2001, p. 01), pode-se definir a energia, como proposto por Maxwell em 1872, como sendo “aquilo que permite a mudança na configuração de um sistema, vencendo a uma força se opõe a essa mudança”. A energia é o que possibilita a realização de trabalho, onde que, para realizarmos qualquer tarefa, é necessário usar uma capacidade interna ou externa ao homem, que chamamos de energia (HADDAD, 2001).

Para Strapasson (2004), entrando na discussão em relação ao uso da energia pelo homem, no âmbito da matriz energética, tem-se uma classificação em três tipos: energia primária, secundária e útil. Conforme a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021, p. 207), a classificação da energia primária como sendo “produtos energéticos providos pela natureza na sua forma direta, como petróleo, gás natural, carvão mineral, resíduos vegetais e animais, energia solar, eólica, etc.”. O mesmo balanço também classifica a energia secundária como “produtos energéticos resultantes dos diferentes centros de transformação que têm como destino os diversos setores de consumo e eventualmente outro centro de transformação”.

A figura 2 ilustra o crescimento da produtividade de energia primária no país desde o ano 1970 até 2020.

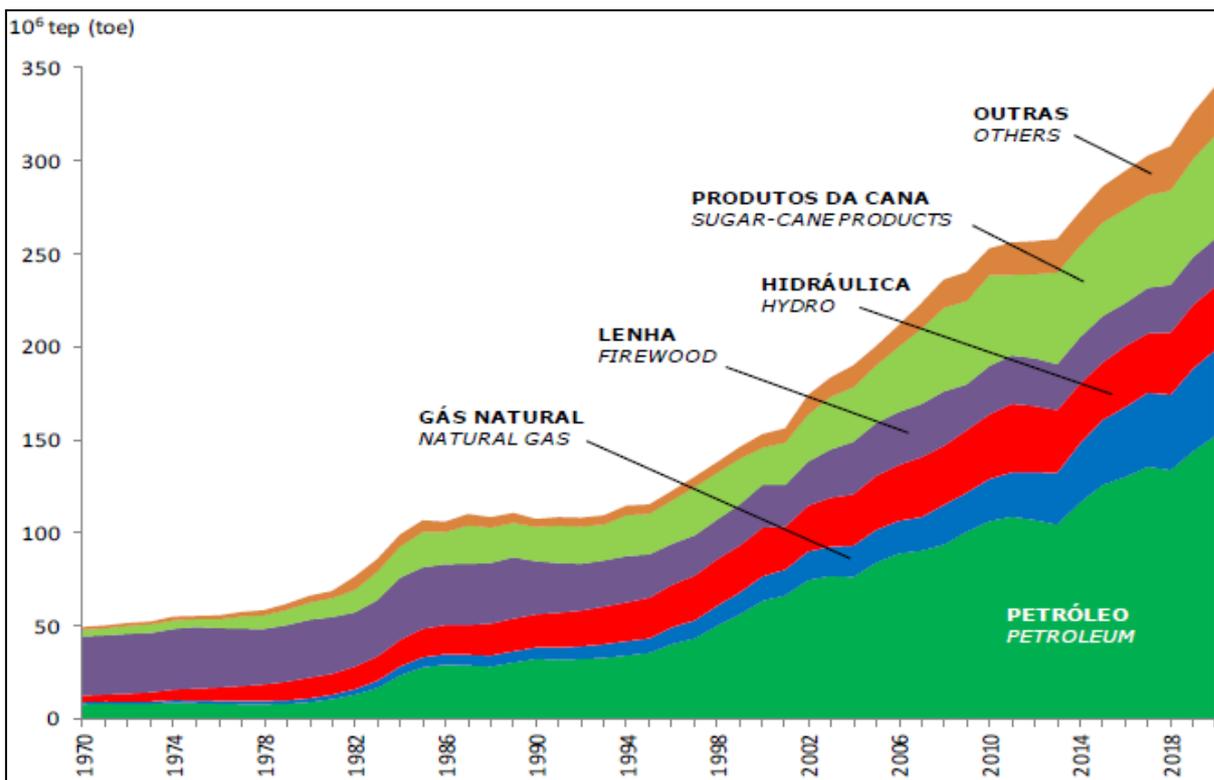


Figura 2: Produtividade de Energia Primária desde 1970 até 2020.
Fonte: BEN (2021)

Pode-se observar, na Figura 2, o crescimento acentuado de geração de energia primária, sendo ainda o petróleo como a principal fonte primária de energia. Os produtos da cana aparecem como a segunda principal fonte de energia primária, mostrando a importância desse setor para o balanço energético nacional.

Baseado em Nogueira (2006), a energia de fontes primárias que utilizam a queima para produção de calor é chamada de energia química e sua aplicação típica associa-se aos processos de combustão em caldeiras onde a energia química de materiais como bagaço de cana e casca de arroz é convertida em energia térmica, na forma de gases, sob altas temperaturas. O conteúdo energético desses combustíveis é medido pelo seu Poder Calorífico, que é um parâmetro que fornece a quantidade de calor disponível por unidade de massa do combustível (NOGUEIRA, 2006).

A figura 3 ilustra o processo de obtenção de energia térmica a partir da energia química.

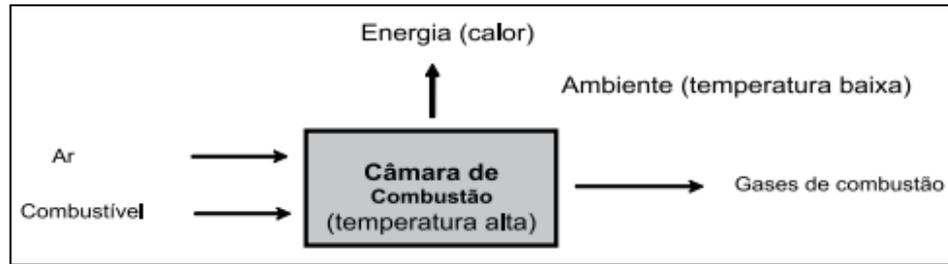


Figura 3: Energia Química nas reações de combustão.
Fonte: Nogueira (2006)

O processo descrito na Figura 3 consiste da queima do combustível dentro de uma câmara de combustão ao adicionar o combustível e o ar. A câmara de combustão fornece calor para uma caldeira e emite gases de combustão para o ambiente (NOGUEIRA, 2006).

Conforme Çengel e Ghajar (2012), existem três mecanismos básicos de transferência de calor que são condução, convecção e radiação e que a transferência de energia ocorre do meio de maior temperatura para o de menor temperatura, acabando o processo quando os dois meios chegam na mesma temperatura. Ainda segundo os mesmos autores, a termodinâmica tem como foco a quantidade de calor transferida, sem levar em consideração o tempo de duração do processo.

Segundo Nogueira (2006), a energia interna é definida como o potencial de provocar mudanças, relacionada à agitação térmica de um determinado material, obtendo sua temperatura através de uma medição. Ainda de acordo com o mesmo autor, em sistemas monofásicos, em que a alteração de temperatura é um resultado da variação de energia interna, o calor específico demonstra a compatibilidade entre esta energia e a mudança de temperatura, já no caso de sistemas que ocorrem mudança de estado e, portanto, com mais de uma fase, o calor latente aponta esta diferença de forma isotérmica. Em se tratando de gases, a variação de energia interna δU relaciona-se com a variação de temperatura δT através do calor específico a volume constante (C_V), como mostra equação 1 (NOGUEIRA, 2006).

$$C_V = \left(\frac{\delta U}{\delta T} \right)_V \quad (1)$$

Baseado em Safder (2021), o aumento do consumo global de energia tende a um crescimento de 39% ao ano entre 2012 e 2040 e os fatores que contribuem para esse crescimento são, entre outros, a urbanização, o rápido desenvolvimento de indústrias e aumento da população. Os combustíveis fósseis sempre tiveram maior participação entre os fornecedores para atender a demanda de energia, porém, os problemas de sustentabilidade ao se utilizar esse

tipo de combustível trouxeram o desenvolvimento de fontes de energias renováveis de forma progressiva em anos recentes (SAFDER 2021).

Conforme o Balanço Energético Nacional 2020 (EPE, 2021), no Brasil, a produção de energia elétrica em centrais controladas pelo estado e centrais privadas atingiram 621,2 TWh em 2020, sendo 0,8% inferior em comparação ao ano de 2019. Desta geração, as centrais elétricas de serviço público foram responsáveis por 82,9% do fornecimento, sendo a geração hídrica como principal fonte de produção (EPE, 2021).

O restante da produção, considerando o agregado de todas as fontes utilizadas, atingiu um montante de 106,5 TWh, dos quais, 60,7 TWh não foram injetados na rede, ou seja, gerados e utilizados pela própria instalação geradora, frequentemente chamada de APE clássica (EPE, 2021).

Nos dias de hoje, o arranjo de distribuição de energia elétrica brasileiro está quase que inteiramente conectado pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), com dimensões e atributos que o possibilita ser único. Os sistemas isolados, não conectados ao SIN, corresponde a 1,7% da demanda de energia elétrica no país, estando em sua maioria na região amazônica. A Figura 4 demonstra o mapa do SIN, que permite observar sua cobertura nacional (INPE, 2017).

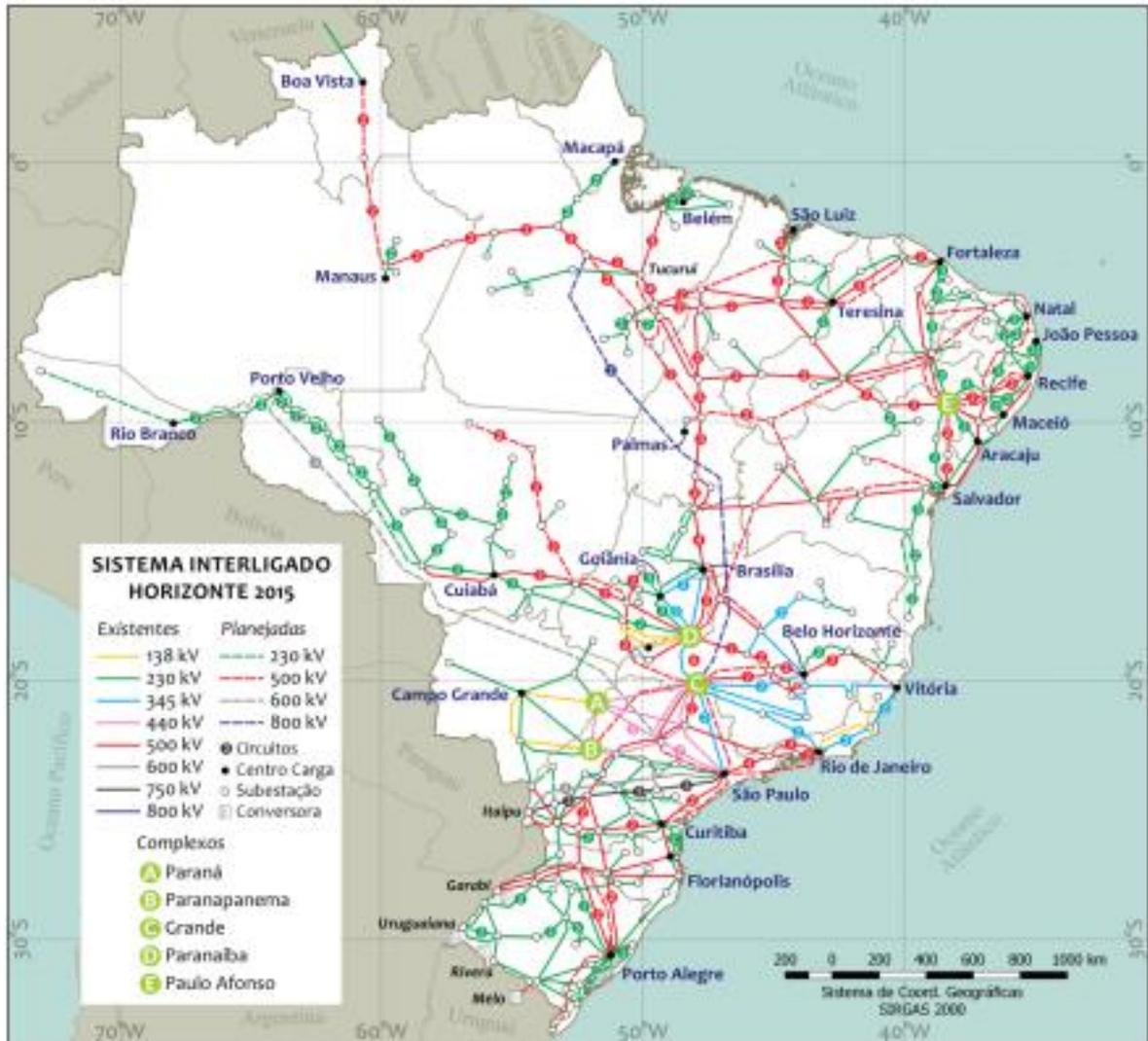


Figura 4: Representação do Sistema Interligado Nacional (SIN).
Fonte: ONS (2015)

Como observa-se na Figura 4, o SIN é um sistema que envolve praticamente todo o território nacional. Os círculos com letras ao centro mostram as principais usinas hidrelétricas, tidas como as principais fontes de energia elétrica atualmente, de onde saem as principais linhas de transmissão.

Segundo a EPE (2021) no Balanço Energético Nacional, o ano de 2020 foi marcado pela pandemia, o que ocasionou grandes impactos na economia mundial e nacional. Alguns setores como o comercial, público e energético sofreram quedas acentuadas no consumo de energia elétrica, porém, o consumo das indústrias oscilou positivamente (0,46%), com destaque para o setor alimentício e bebidas. No setor residencial, devido as políticas de distanciamento social, o tele trabalho adotado por vários segmentos da economia, houve um crescimento de 4,05% no gasto de energia elétrica em residências (EPE, 2021).

De acordo com Khosravi (2021), nos últimos anos, os países têm se mobilizado para reduzir a participação de fontes de energia de hidrocarbonetos (por exemplo, carvão, petróleo e gás natural) na geração de energia devido aos seus efeitos no aquecimento global e outros problemas ambientais. Portanto, os estudiosos têm se esforçado para desenvolver sistemas de energia mais sustentáveis. Ainda de acordo com o mesmo autor, fontes de energia renovável (ER), como a energia solar, não usam recursos limitados além de produzirem menor contaminação ambiental e como o processo de conversão de energia é uma das principais fontes de emissão de carbono, recursos renováveis estão surgindo como uma solução para a redução dos problemas que envolvem a utilização de recursos não renováveis. Atualmente, sistemas ER combinados com tecnologias de armazenamento de energia estão se tornando potencialmente tecnologias disruptivas (KHOSRAVI, 2021).

2.2 Energia Solar Térmica Concentrada

Conforme Bianchini (2013), o sol fornece anualmente aproximadamente $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia, sendo a maior fonte de energia na Terra e comparando com o consumo mundial, esse valor é mais que 100 vezes o consumido, embora seja impossível o aproveitamento de toda energia disponibilizada pelo sol. Uma utilização bastante pertinente é o uso dessa energia para converter em energia térmica, aquecendo fluidos utilizados na geração de potência mecânica (BIANCHINI, 2013).

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2017), para entender a energia que é transmitida pelo sol, deve-se ter em mente que ela varia de acordo com o lugar e o tempo, levando a estudar alguns conceitos da astronomia como a posição relativa entre o Sol e a Terra. Ainda conforme o INPE (2017), a Terra gira em torno do Sol a uma distância média aproximada de 150 milhões de quilômetros, levando 365,25 dias para completar um ciclo e essa distância é variável ao longo do tempo, podendo assumir valores entre $1,47 \times 10^8$ km e $1,52 \times 10^8$ km e, como resultado, uma oscilação da irradiação solar entre 1325 W/m^2 e 1412 W/m^2 . Por definição, a constante solar tem o valor médio de irradiação igual a 1366 W/m^2 (INPE, 2017).

A Figura 5 mostra como a duração do dia varia ao longo do ano para diferentes latitudes.

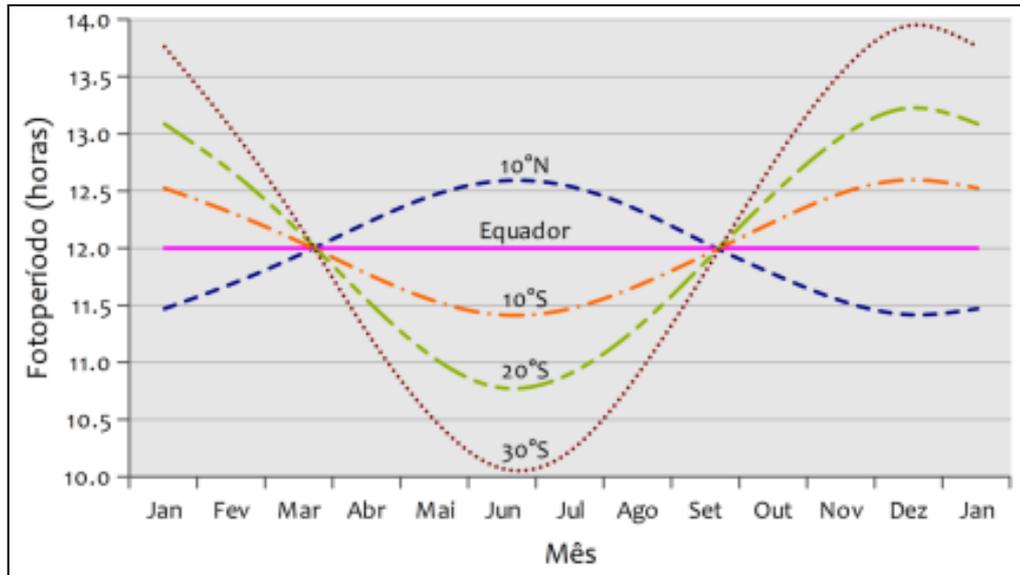


Figura 5: Variabilidade do foto período ao longo do ano para diferentes latitudes.
Fonte: INPE (2017).

Como visto na Figura 5, nos meses de junho e julho os dias são mais curtos que as noites no hemisfério sul. Já no hemisfério norte acontece ao contrário, as noites são mais longas para esse mesmo período. Essa diferença de presença da luz solar é observada em maior intensidade à medida que se afasta da linha do Equador.

Segundo Martins (2013), de acordo com a concepção heliocêntrica da terra, existe uma mudança das estações do ano e uma variação da duração do dia como consequência do movimento da Terra em torno do Sol. O mesmo autor relata que o eixo de rotação da Terra está inclinado em relação ao plano de sua órbita, como resultado em certas épocas a região norte recebe iluminação mais forte e em outras épocas a região sul recebe mais luz solar.

A figura 6 mostra a geometria Sol-Terra que determina as estações do ano e a duração do dia.



Figura 6: Geometria Sol-Terra, estações do ano e a duração do dia.
Fonte: INPE (2017).

Segundo a Figura 6, as estações do ano influenciam diretamente na duração do dia e são determinadas pelos solstícios e equinócios. O solstício é o momento em que o sol atinge a maior declinação em latitude medida a partir do equador, durante seu movimento aparente no sol. O equinócio é definido como sendo o instante em que a o sol cruza a linha do Equador terrestre em sua órbita aparente (INPE, 2017).

A figura 7 ilustra os ângulos notáveis em solarimetria, resultante do movimento de translação orbital.

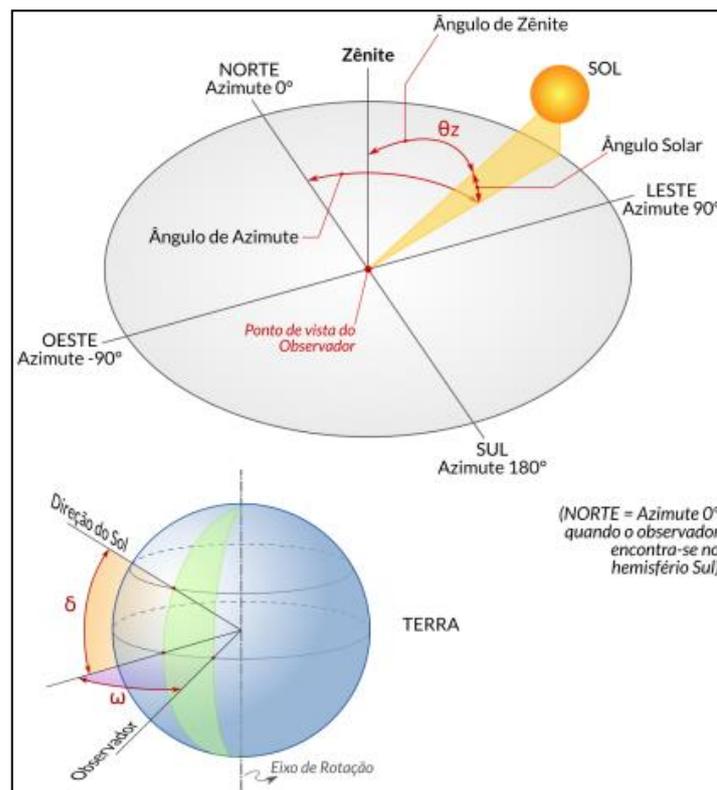


Figura 7: Ângulos notáveis em solarimetria.
Fonte: INPE (2017).

Pela Figura 7, observa-se que o ângulo horário solar (ω) reflete o deslocamento angular da movimentação aparente do Sol de acordo com a rotação da Terra. O ângulo zenital solar (θ_z) é medido entre a linha vertical a partir do ponto de vista do observador e a linha que tem direção desse ponto ao sol. O ângulo formado pela linha que parte do sol em direção ao plano horizontal e a linha norte-sul desse plano é denominado ângulo azimutal (INPE, 2017).

A Figura 8 aponta a abrangência de valores da declinação solar durante o ano.

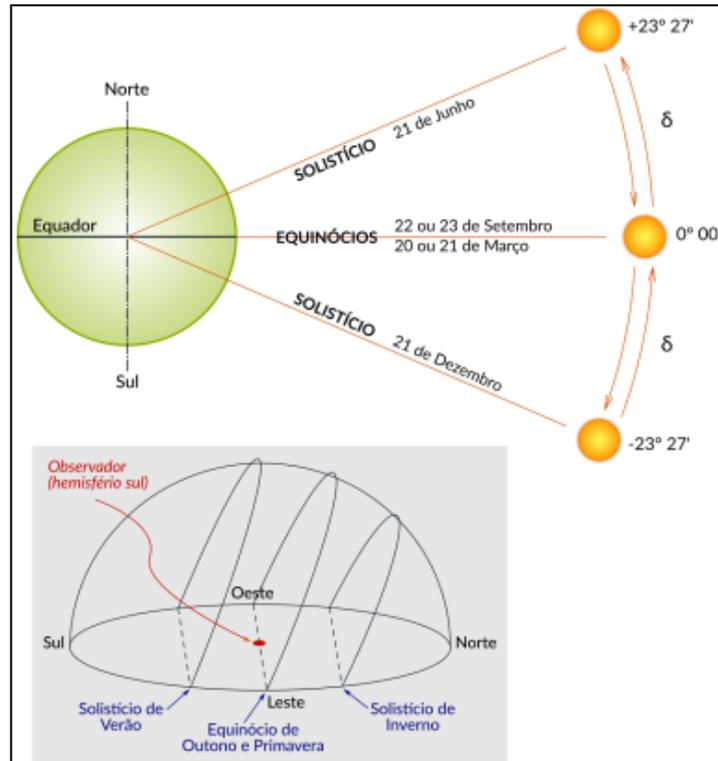


Figura 8: Amplitude de valores do ângulo de declinação.
Fonte: INPE (2017).

A Figura 8 mostra a declinação solar (δ), que pode ser definida pelo ângulo entre a inclinação do plano equatorial da Terra e uma linha imaginária na direção Terra-Sol. Ao longo do ano, esse ângulo pode variar de $-23^{\circ}27'$ a $+23^{\circ}27'$ (INPE, 2017).

Para coleta de dados de recursos solares, tem-se como fontes o satélite de dados derivados e a medição terrestre, podendo utilizar um ou outro dependendo do local de estudo. Para poder calibrar e melhorar a precisão dos dados obtidos por outras fontes, como satélites ou estações meteorológicas, utiliza-se a medição local com base em terra (MILLER, 2012).

De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (2017) as medidas de irradiação (Wh/m^2 ou J/m^2) ou irradiância (W/m^2) solar vêm sendo realizadas há algumas décadas e constituem uma base de dados muito importante para estudos de climatologia da radiação solar. Essa base de dados é utilizada para os estudos de viabilidade técnica e econômica de projetos que utilizam o sol como fonte de energia, assim como para validação ou desenvolvimento de novos modelos (INPE, 2017).

Para tornar uma matriz energética mais limpa, o uso da energia solar é uma boa alternativa, tornando-a menos dependentes de outras fontes não renováveis, como o petróleo, reduzindo assim a emissão de gases considerados poluentes (BIANCHINI, 2013).

A localização do Brasil, que está em sua maior parte na zona intertropical, fornece um grande potencial para utilizar a energia proveniente do sol. Grandes centrais de energia térmica concentrada podem ser uma alternativa de utilização dessa energia, possibilitando viabilizar projetos de médio e longo prazo (BIANCHINI, 2013).

Para avaliar a irradiação solar na superfície brasileira, tem-se dois modelos numéricos operacionais otimizados: o modelo BRASIL-SR e o modelo GL. De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017, p. 30), o modelo BRASIL-SR é:

Um modelo físico para obtenção de estimativas da radiação solar incidente na superfície que combina a aproximação de “dois-fluxos” na solução da equação de transferência radiativa com o uso de parâmetros determinados de forma estatística a partir de imagens de satélite.

A energia solar térmica concentrada, conhecida pela sigla CSP (*Concentrated Solar Power*), é uma tecnologia que utiliza concentradores para direcionar a radiação solar em um receptor, aquecendo um fluido de transferência que é transferido para um bloco de potência onde é gerada a eletricidade (BIANCHINI, 2013).

A irradiação direta é o tipo de irradiação utilizada para concentrar a energia solar em um receptor. Estudos de viabilidade indicam que, para apresentar um uso potencial da CSP, deve-se utilizar locais que possuem uma irradiação solar anual acima de 2000 kWh/m² e baixa nebulosidade (SCHLECHT e MEYER; 2012).

A figura 9 aponta a irradiação direta normal total anual no mapa brasileiro.

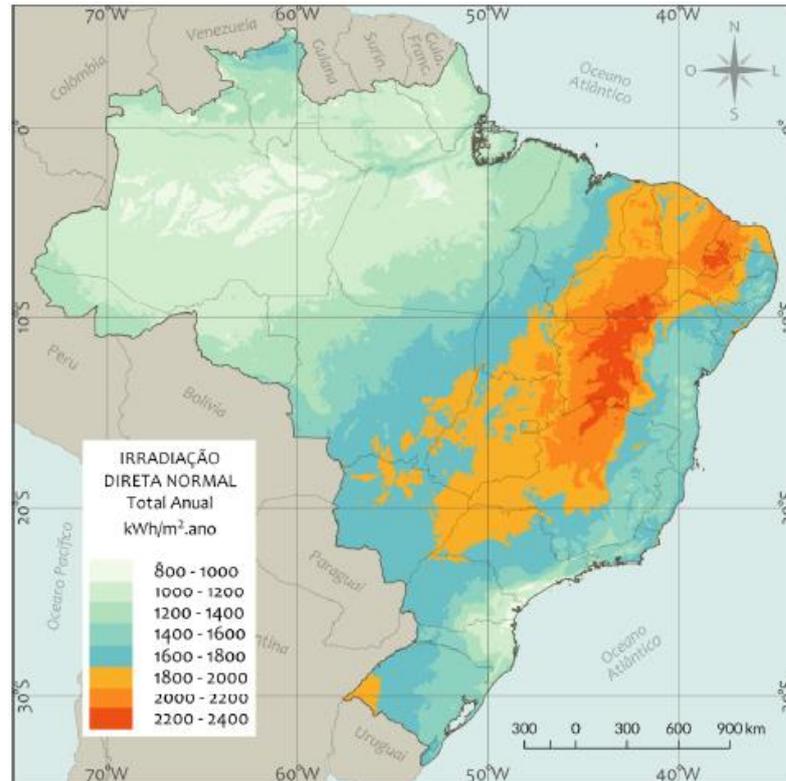


Figura 9: Mapa do total anual de irradiação solar direta normal.
Fonte: INPE (2017).

No Brasil, tais valores anuais são vistos nas estimativas apresentadas no Atlas Brasileiro de Energia Solar, mostrado na Figura 9, observados em uma longa série de dados indicando uma grande área com potencial adequado. A região do semiárido nordestino, assim como uma área localizada ao sul da Região Centro-Oeste apresentam valores que enquadram no potencial para geração heliotérmica (INPE, 2017).

Conforme Duffie e Beckman (1991), pode-se definir um coletor solar como sendo um tipo de trocador de calor, que converte a energia da radiação solar em energia térmica, transferindo para um fluido de trabalho. O componente principal de um concentrador é o coletor em si. O fluido de trabalho que passa pelo coletor recebe calor do coletor, gerado pela conversão da radiação incidente pelo coletor (DUFFIE e BECKMAN, 1991).

Segundo o INPE (2017), as principais tecnologias de concentradores lineares são os coletores parabólicos (*parabolic-trough collectors*) e os coletores Fresnel (*linear Fresnel collectors*). As usinas que utilizam a energia solar para geração termelétrica possuem, na maioria dos casos, a tecnologia de coletores parabólicos, como o mostrado na Figura 10 (INPE 2017).



Figura 10: Coletores solares parabólicos.
Fonte: INPE (2017).

Segundo Kalogirou (2009), define-se o concentrador em uma superfície capaz de refletir os raios solares em um tubo receptor localizado ao longo de seu eixo longitudinal. O coletor solar parabólico possui geometria parabólica cilíndrica, como observado na figura 10. A radiação incide de forma perpendicular sobre a superfície na direção do foco do coletor. Composta geralmente por um vidro espelhado disposto sobre uma estrutura metálica, a superfície refletora é dotada de um dispositivo capaz de rastrear o sol. Conforme mostrado na Figura 11, o receptor é posicionado no centro longitudinal do coletor, de forma a estar alinhado com sua linha focal (KALOGIROU, 2009).

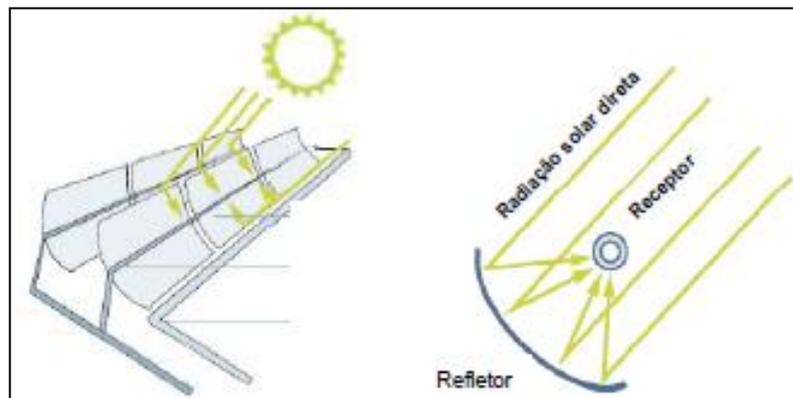


Figura 11: Diagrama esquemático do coletor.
Fonte: LODI (2011).

Na Figura 11 mostra os raios solares sendo direcionados ao receptor. O receptor consiste em um tubo metálico envolto por uma película seletiva escura, que tem grande absorção da radiação incidente. Com o objetivo de diminuir a perda de calor por convecção, um cilindro de vidro abriga o coletor, permitindo que a luz solar refletida pelo coletor passe para o receptor. Dentro do receptor passa um fluido, que circula em um circuito fechado, que absorve a energia

solar trocando calor com a água para produzir vapor. O vapor é então utilizado em um ciclo convencional de geração de energia, como o ciclo Rankine, por meio de uma turbina a vapor (LODI, 2011).

A Figura 12 mostra os principais componentes do condensador cilíndrico parabólico. Geralmente, o comprimento da matriz de espelhos pode chegar a 100 m com a largura de cada espelho ficando entre 5 m e 6 m (PHILIBERT et al., 2010).

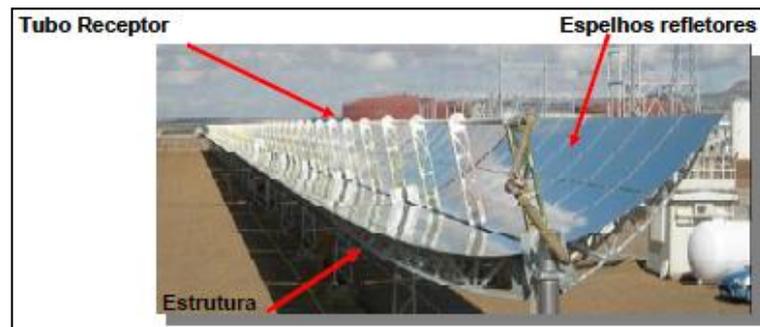


Figura 12: Componentes principais do concentrador cilíndrico-parabólico.
Fonte: LODI (2011).

Na Figura 12, dentre os componentes principais, é mostrada a localização do tubo receptor. A concentração obtida no tubo receptor gera altas temperaturas, fazendo com que a radiação solar seja transformada em calor útil. Após o processo de transferência de calor, o coletor cilíndrico-parabólico pode alcançar altas temperaturas, a depender do fluido utilizado para a troca térmica (KALOGIROU, 2009).

2.3 Biomassa

De acordo com o Balanço Energético Nacional (EPE, 2021), a biomassa é uma importante fonte de energia não fóssil composta por matéria orgânica de origem animal ou vegetal. A biomassa contém energia armazenada na forma de energia química. As fontes de biomassa energética podem ser divididas em biomassa energética de resíduos e subprodutos da agricultura, entre outros.

Tem-se a produção de cana-de-açúcar e etanol como um segmento de indústria importante para o desenvolvimento econômico brasileiro. Várias plantações de cana alimentam esse sistema que tem a produção de açúcar, etanol e, conseqüentemente, a produção de biomassa. A figura 13 ilustra os canaviais espalhados pelo território. O bagaço de cana como recurso renovável para geração de energia tem destaque no financiamento do Programa

Brasileiro de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), que envolve ER e pode ser comercializado via mercado de energia (KHOSRAVI, 2020).

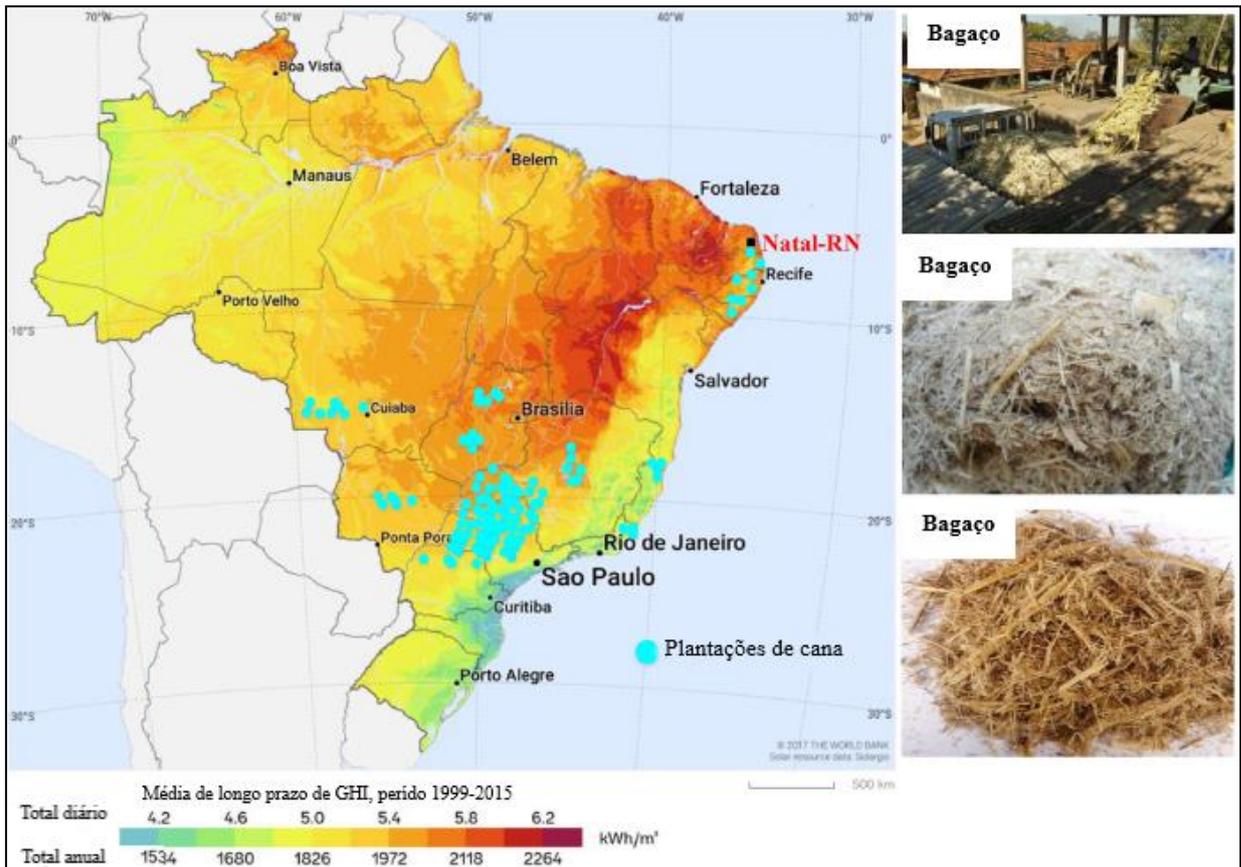


Figura 13: Campos de produção de cana-de-açúcar e mapa de irradiância horizontal global (GHI).
Fonte: KHOSRAVI (2020).

Analisando o mapa da Figura 13, pode-se adotar/selecionar regiões onde a irradiação é favorável para a utilização de energia solar térmica, nas proximidades dos locais de produção de bagaço de cana, viabilizando a utilização do sistema híbrido de geração de energia elétrica.

Segundo Guardabassi (2006), a utilização de biomassa como fonte de energia é importante para diversificar a matriz energética de um país e reduzir a sua dependência em relação a fontes não renováveis. Com isso, o sistema fica mais independente de fontes como o petróleo, garante o suprimento de energia e torna menos vulnerável às questões políticas e variações do preço dos combustíveis fósseis, assim como a redução de gastos com importação de petróleo. (GUARDABASSI, 2006).

Conforme o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), no ano de 2020, a produção de cana-de-açúcar atingiu a marca de 662,1 milhões de toneladas, o que corresponde a um acréscimo de 3,6% em comparação como ano de 2019 (EPE, 2021).

O uso de biomassa está relacionado à diminuição da emissão de gases de efeito estufa e ajuda no decréscimo dos impactos locais, regionais e globais. Isso se dá devido ao bagaço de cana-de-açúcar apresentar balanço nulo de emissões, pois as emissões provenientes da queima do bagaço são absorvidas durante o crescimento da planta (GUARDABASSI, 2006).

Segundo Albuquerque *apud* Silva e Morais (2008), a briquetagem vem sendo utilizada há décadas em alguns países da Europa e na América do Norte, sendo um processo bem desenvolvido e difundido, muito utilizado nos setores industriais e comerciais, tendo começado sua utilização quando ocorreu a escassez de combustível e energia que atingiu a região europeia durante a primeira guerra mundial.

Para se obter briquetes a partir de uma biomassa, as partes do material sólido são prensadas para formar blocos definidos e de maior tamanho, denominado de processo de briquetagem. Com esse processo tem-se como resultado um produto de maior valor comercial, aumentando a sua densidade após processada a biomassa, podendo chegar até 5 vezes o ganho de densidade energética (RONDEIRO, 2008).

A Figura 14 ilustra dois tipos de briquetes.



Figura 14: Briquetes em forma de bolacha e tarugos.
Fonte: RONDEIRO (2008).

Os briquetes na forma demonstrada na Figura 14 pode ser usado diretamente em caldeiras e tem como uma das suas vantagens o armazenamento, devido sua fabricação em tamanhos padrões. A padronização dos briquetes reduz o volume de ocupado no depósito, viabilizando assim a manutenção de estoques reguladores e de emergência. Outra vantagem importante é a regularidade térmica em sua combustão na fornalha (RENDEIRO, 2008).

Depois de todo o processo de obtenção da biomassa, envia-se então para a caldeira, e o vapor de alta/média pressão é usado para acionar a turbina a vapor, que é utilizado na geração de energia mecânica para acionar um gerador. O vapor de baixa pressão que sai das turbinas, pode ser aproveitado como fonte de energia térmica no processo de dessalinização. (GUARDABASSI, 2006).

Segundo estudos realizados pelo Centro de Tecnologia Canavieira *apud* Hassuani (2005), o bagaço de cana possui cerca de 45% de carbono, 6% de hidrogênio, 0,5% de nitrogênio, 45% de oxigênio, 0,1% de enxofre e 0,02% de cloro. Outros materiais como o potássio, cálcio, magnésio entre outros aparecem em concentrações muito baixas (HASSUANI, 2005).

A tabela 1 quantifica o potencial de fornecimento de biomassa de cana-de-açúcar distribuído por mesorregião, no ano de 2015.

Tabela 1: Disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar

Mesorregiões	Disponibilidade Bagaço (t)	Disponibilidade Palha Solta (t)	Disponibilidade Palha enfardada (t)
Araçatuba	548.375	76.773	115.159
Araraquara	649.092	90.873	136.309
Assis	719.926	100.790	151.185
Bauru	719.364	100.711	151.066
Campinas	555.179	77.725	116.588
Central Mineira	511.128	71.558	107.337
Noroeste de Minas	617.823	86.495	129.743
Piracicaba	561.941	78.672	118.008
Presidente Prudente	819.874	114.782	172.173
Ribeirão Preto	968.225	135.552	203.327
São José do Rio Preto	857.522	120.053	180.080
Sudeste MT	634.253	88.795	133.193
Sudoeste MS	714.703	100.058	150.088
Sul Goiano	881.654	123.432	185.147
Triângulo Mineiro	603.359	84.470	126.705

Fonte: Trombeta (2015)

Com os dados disponibilizados por Trombeta (2015) e mostrados na Tabela 1, pode-se estabelecer locais indicados para o estudo de viabilidade da utilização da biomassa do bagaço de cana-de-açúcar para a cogeração de uma usina termelétrica.

Percebe-se o índice de impurezas vegetais, referentes à palha da cana-de-açúcar, que entra no sistema industrial através do processo de colheita mecanizada da cana-de-açúcar. Após

a colheita, cerca de 75% da palha da cana fica no campo, que é reutilizada nos canaviais a fim de minimizar a degradação do solo. A coleta dessa palha é feita por meio de novas operações de colheita, sendo o processo de enfardamento o mais utilizado no setor (TROMBETA, 2015).

2.4 Análise termodinâmica do ciclo híbrido

Nos sistemas de cogeração usando biomassa, existe uma restrição ao aumento da temperatura na caldeira devido às especificidades do combustível. Em caldeiras de biomassa, a corrosão ocorre pela combustão de material contendo elementos corrosivos, tais como metais alcalinos, cloro, e o efeito aumenta com o aumento da temperatura da caldeira (BRAND et al., 2021). Isso acarreta desperdício de material, vazamentos de tubos, falhas de tubos e uma vida útil mais curta dos tubos da caldeira. Na pior das hipóteses, a corrosão pode levar ao desligamento de emergência de uma caldeira, com complicações econômicas e de segurança significativas. Por outro lado, alguns sistemas de potência, devido às condições da fonte de energia utilizada, como os sistemas geotérmicos, têm restrições ao aumento da temperatura da caldeira. Os sistemas híbridos podem surgir como uma solução para superar esse problema (OYAMA, 2017).

Novos sistemas híbridos de energia estão sendo estudados para comercialização e aumento de sua utilização. Um sistema proposto por Khosravi (2020), é mostrado na figura 15.

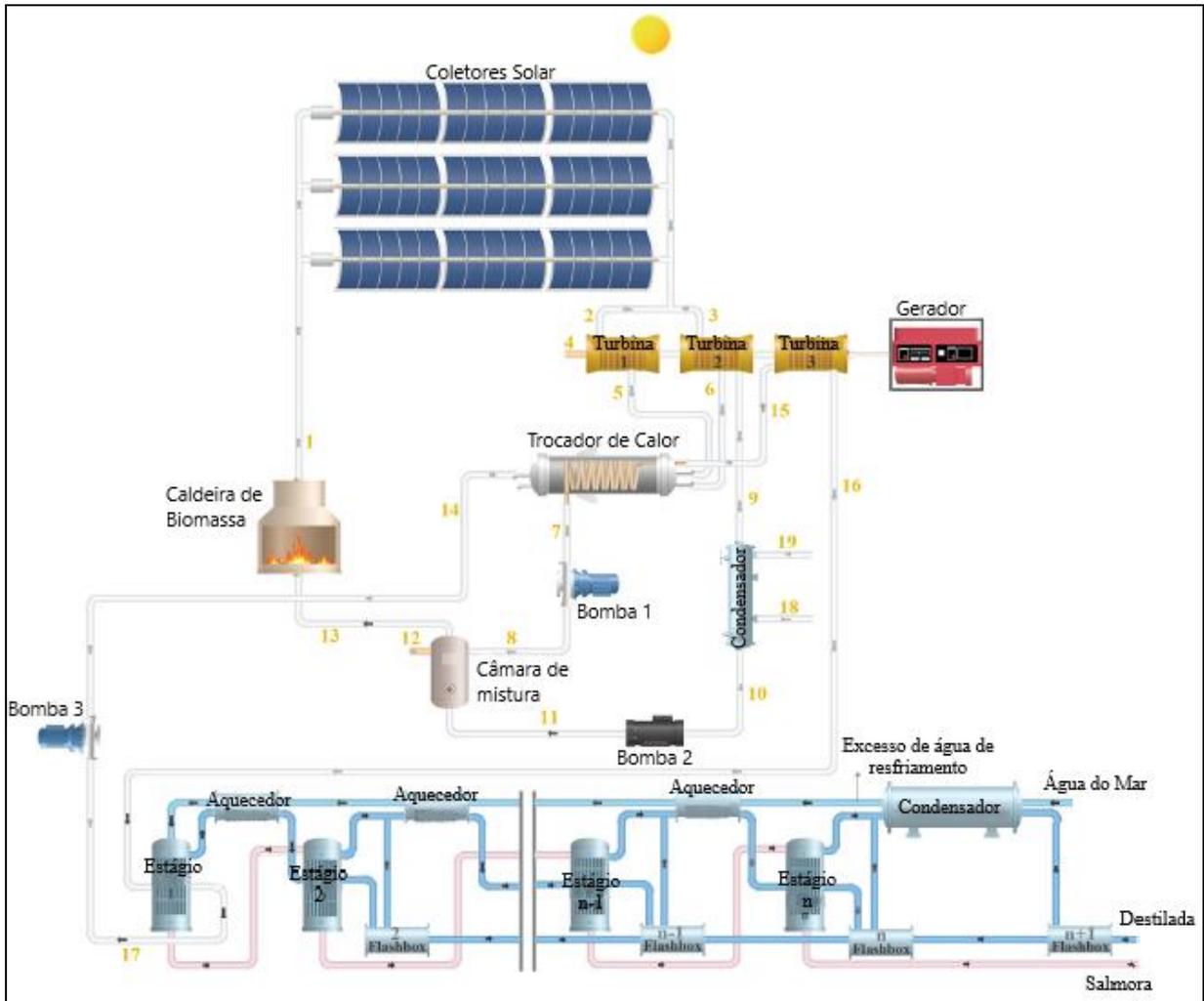


Figura 15: Sistema híbrido de energia equipado com unidade de dessalinização.
 Fonte: KHOSRAVI (2020).

O sistema é projetado com base em uma usina de biomassa que possui coletores solares térmicos e uma unidade de dessalinização conforme ilustra a figura 15. Compõe o sistema: uma caldeira de biomassa, coletores solares térmicos, turbina a vapor, gerador, condensador, trocador de calor, bombas, câmara de mistura e unidade dessalinizadora de múltiplos passes (KHOSRAVI, 2020).

Ainda na Figura 15, observa-se que os coletores solares podem ter duas finalidades: podem ser considerados como um sistema auxiliar para aumentar a entalpia de entrada da turbina, ou podem ser usados como uma caldeira em um ciclo Rankine, que fornece a energia necessária na entrada da turbina por meio da energia solar. Enquanto o sistema não tiver a biomassa como combustível, a energia solar pode desempenhar o papel de fornecimento da energia necessária para o vapor. Ou seja, os coletores solares são considerados um sistema de geração direta de vapor. Uma parte desse vapor é direcionada para fornecer a energia necessária

para a unidade de dessalinização. Assim, o coletor solar desempenha o papel de caldeira, e a unidade de dessalinização funciona como um condensador para o ciclo de energia. Durante o dia, os coletores solares contribuem com um fornecimento de energia que reduz o consumo de biomassa como combustível. A vazão mássica do vapor é constante e o consumo de combustível na caldeira de biomassa é alterado durante a noite e o dia (KHOSRAVI, 2020).

2.4.1 Coletor Solar

Para o coletor térmico solar, o calor produzido pelo coletor pode ser calculado, de acordo com Almeida & Oliveira (2008) *apud* Teixeira (2009):

$$\dot{Q}_{e,sol} = \eta \times I \times A_{sol} \quad (2)$$

Em que: $\dot{Q}_{e,sol}$ é o fluxo de calor recebido pelo sol; I é a irradiação solar, A_{sol} é a área da superfície do coletor solar e η é o rendimento térmico considerando uma série de características do coletor.

Considerando o coletor solar como um volume de controle (ÇENGEL e BOLES, 2013):

$$\dot{Q}_{e,sol} = \dot{m}_e(h_s - h_e) \quad (3)$$

Em que: \dot{m}_e é a vazão mássica do vapor que entra no coletor solar; h_s é o valor de entalpia do vapor ao saí do sistema de coletar solar, sendo entalpia de entrada a variável h_e .

2.4.2 Turbina

A potência produzida pela turbina 1 (\dot{W}_{T1}) é determinada considerando que uma parte do vapor produzido vai para a turbina 1 e outra parte é direcionada para a turbina 2 (KHOSRAVI, 2020).

$$\dot{W}_{T1} = \dot{m}_{e,t1}h_{e,t1} - \dot{m}_d h_{d,R} - \dot{m}_{tc1}h_{tc1,R} \quad (4)$$

Sendo: $h_{e,t1}$ a entalpia de entrada na turbina 1; $\dot{m}_{e,t1}$ a vazão mássica do vapor que entra na turbina 1; \dot{m}_d a vazão mássica de vapor que alimenta o processo de dessalinização; $h_{d,R}$ a entalpia real do vapor que passa pelo processo de dessalinização; \dot{m}_{tc1} a vazão mássica de vapor da turbina 1 que vai para o trocador de calor e $h_{tc1,R}$ a entalpia real do vapor da turbina 1 que vai para o trocador de calor.

E para as turbinas 2 e 3 tem-se:

$$\dot{W}_{T2} = \dot{m}_{e,t2}h_{e,t2} - \dot{m}_{tc2}h_{tc2,R} - \dot{m}_{cond}h_{cond,R} \quad (5)$$

$$\dot{W}_{T3} = \dot{m}_{t3}(h_{e,t3} - h_{s,t3}) \quad (6)$$

Em que: \dot{W}_{T2} é a potência produzida pela turbina 2; $\dot{m}_{e,t2}$ é a vazão mássica do vapor que entra na turbina 2; $h_{e,t2}$ é a entalpia do vapor que entra na turbina 2; \dot{m}_{tc2} é a vazão mássica do vapor que vai para o trocador de calor a partir da turbina 2; $h_{tc2,R}$ é a entalpia real do vapor que vai para o trocador de calor a partir da turbina 2; \dot{m}_{cond} e $h_{cond,R}$ são a vazão mássica e entalpia real do vapor que sai da turbina 2 para o condensador, respectivamente. \dot{W}_{T3} é a potência produzida pela turbina 3; \dot{m}_{t3} a vazão mássica do fluido que vai para a turbina 3; $h_{e,t3}$ e $h_{s,t3}$ as entalpias de entrada e saída do vapor que passa pela turbina 3, respectivamente.

A entalpia real do fluido que passa pelo processo de dessalinização é calculada considerando a eficiência isentrópica da turbina como 0,85. A partir dessa suposição, tem-se (SARKAR, 2015):

$$h_{d,R} = h_{s,cald} - 0,85(h_{s,cald} - h_d) \quad (7)$$

Em que: h_d é a entalpia do vapor que sai da turbina 1 para alimentar o processo de dessalinização e $h_{s,cald}$ é entalpia do vapor que sai da caldeira.

$$h_{tc1,R} = h_{s,cal} - 0,85(h_{s,cal} - h_{tc1}) \quad (8)$$

Sendo h_{tc1} a entalpia do vapor que sai da turbina 1 para o trocador de calor.

2.4.3 Trocador de calor

Para o processo de transferência de calor no trocador de calor, uma parte do vapor da turbina 2 é direcionado para o trocador de calor, sendo o restante direcionado para o condensador. Além disso, da turbina 1, uma parte do vapor é extraído para uso no processo de dessalinização.

$$\dot{Q}_{TC1} = \dot{m}_{tc1}h_{tc1,R} + \dot{m}_{tc2}h_{tc2,R} - \dot{m}_{b1}h_{b1} \quad (9)$$

Em que: \dot{Q}_{TC1} é a taxa de transferência de calor gerado pelo trocador de calor a partir da turbina 1; \dot{m}_{b1} e h_{b1} são a vazão mássica e entalpia do fluido que entra na bomba 1.

$$\dot{Q}_{TC2} = \dot{m}_{b3} c_p (T_{b3} - T_{e,3}) \quad (10)$$

Sendo: \dot{Q}_{TC2} a taxa de transferência de calor gerado pelo trocador de calor a partir da turbina 2; c_p o calor específico do fluido no trocador de calor; T_{b3} e $T_{e,3}$ as temperaturas do fluido que sai da bomba 3 para o trocador de calor e do vapor que sai do trocador de calor para a turbina 3, respectivamente.

2.4.4 Bomba

O trabalho real realizado pela bomba é determinado pela divisão do trabalho isentrópico pela eficiência isentrópica da bomba ($\eta_p = 0,85$). O trabalho realizado pelas bombas 1, 2 e 3 são representados, respectivamente, por \dot{W}_{b1} , \dot{W}_{b2} e \dot{W}_{b3} . As eficiências mecânica e elétrica das bombas são consideradas iguais a 1, assim tem-se (PÁSCOA, 2017):

$$\dot{W}_{b1} = \dot{m}_{b1} v_{b1} (p_{s,b1} - p_{e,b1}) / \eta_p \quad (11)$$

Sendo: v_{b1} o volume específico que o fluido entra na bomba 1; $p_{e,b1}$ e $p_{s,b1}$ as pressões de entrada e saída da bomba 1, respectivamente.

$$\dot{W}_{b2} = \dot{m}_{b2} v_{b2} (p_{s,b2} - p_{e,b2}) / \eta_p \quad (12)$$

Em que: \dot{m}_{b2} e v_{b2} são a vazão e volume específico do fluido que entra na bomba 2; $p_{e,b2}$ e $p_{s,b2}$ são a pressão de entrada e saída do fluido na bomba 2.

$$\dot{W}_{b3} = \dot{m}_{b3} v_{b3} (p_{s,b3} - p_{e,b3}) / \eta_p \quad (13)$$

Sendo: \dot{m}_{b3} e v_{b3} a vazão e volume específico do fluido que entra na bomba 3; $p_{ent,bomb3}$ e $p_{sai,bomb3}$ as pressões de entrada e saída do fluido na bomba 3.

2.4.5 Caldeira

O fornecimento de calor para a caldeira é calculado por (KHOSRAVI, 2020):

$$\dot{Q}_{fornecido} = \dot{m}_{comb} \cdot PCI_{comb} \cdot \eta_{combustão} \quad (14)$$

Em que: \dot{m}_{comb} é a vazão mássica do combustível e $PCI_{comb} \cdot \eta_{combustão}$ é o poder calorífico inferior do combustível levando em consideração a eficiência

2.4.6 Condensador

O condensador é dimensionado a partir da transferência de calor entre dois volumes de controle definidos, sendo o lado do condensado e o lado do refrigerante, podendo ser representado pela seguinte equação (INCROPERA e DEWITT, 1992):

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_f (h_q - h_f) \quad (15)$$

Sendo: \dot{m}_f e h_f a vazão mássica e a entalpia do fluido frio que entra no condensador e h_q a entalpia do fluido que sai do condensador.

Para a unidade de dessalinização (KHOSRAVI, 2020):

$$\dot{Q}_{UD} = \dot{m}_{e,UD} (h_{e,UD} - h_{s,UD}) \quad (16)$$

Em que: $\dot{m}_{e,UD}$ e $h_{e,UD}$ são a vazão mássica e entalpia do fluido que entra na unidade dessalinizadora e $h_{s,UD}$ a entalpia do fluido que sai da unidade dessalinizadora.

A eficiência energética total é (KHOSRAVI, 2020):

$$\eta_{energ} = \frac{\dot{W}_{T1} + \dot{W}_{T2} + \dot{W}_{T3} - \dot{W}_{b1} - \dot{W}_{b2} - \dot{W}_{b3} + \dot{Q}_{UD}}{\dot{Q}_{fornecido} + \dot{Q}_{e,sol}} \quad (17)$$

E o ganho de eficiência energética é calculado por (KHOSRAVI, 2020):

$$\eta_{EficEn} = \frac{\dot{W}_{T1} + \dot{W}_{T2} + \dot{W}_{T3} - \dot{W}_{b1} - \dot{W}_{b2} - \dot{W}_{b3} + \dot{Q}_{UD}}{\dot{Q}_{fornecido}} \quad (18)$$

2.5 Considerações finais

Neste capítulo procura-se dispor dos conceitos de energia, observando seus diferentes tipos e utilizações. Para isso considera-se os aspectos técnicos sobre a energia primária e secundária e suas formas de encontrar na natureza, suas transformações e maneiras de utilizá-las em seus vários modos. Aborda-se também as fontes de geração de energia elétrica que mais são utilizadas no país assim como um aspecto de tendência de utilização nos próximos anos.

Entrando nos aspectos de energia solar térmica concentrada, busca-se abordar o assunto, levando em consideração as questões astronômicas que envolve o fornecimento da energia provinda do sol, tais como os locais e épocas do ano que são mais favoráveis para a utilização dessa forma de fonte de energia.

Para conceituar a outra fonte de energia utilizada neste trabalho, descreve-se a biomassa como fonte de geração de energia para caldeiras e apresenta-se as equações utilizadas no ciclo combinado de geração de energia elétrica.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo descreve a característica do desenvolvimento da pesquisa, com o objetivo de determinar a sua natureza e classificação, a área da pesquisa, o método e os instrumentos de coleta utilizados assim como as variáveis e indicadores adotados, para que possam ser feitas as análises e os cálculos necessários.

3.1 Tipo de Pesquisa

Segundo Gil (1999), para ser caracterizada como uma pesquisa científica, é importante ressaltar os passos que possibilitaram a conclusão da verificação do estudo, tornando importante definir os métodos que permitiram chegar à conclusão da pesquisa.

De acordo com Silva (2004), a pesquisa quantitativa é definida com tudo que pode ser traduzido em números com o intuito de classificar e analisar os dados, requerendo recursos estatísticos para isso. Em relação a abordagem deste estudo, tem-se uma pesquisa quantitativa, pois utiliza dados e cálculos numéricos.

Quanto ao objetivo, neste estudo tem-se uma pesquisa descritiva na qual é necessário observar e analisar o princípio de funcionamento do ciclo Rankine para descrever, registrar e comparar os resultados obtidos de acordo com as mudanças das variáveis do sistema.

A pesquisa descritiva busca elucidar fatos ou fenômenos sem manipulá-los, correlacionando o estudo com outros fenômenos, sua natureza e suas características. Pode-se definir como o estudo e a descrição das características da realidade pesquisada favorece a formulação clara do problema e da hipótese como tentativa de solução. Em resumo, trabalha sobre dados adquiridos de forma real (CERVO *et al.*, 2006).

Segundo Yin (2001), os estudos de caso envolvem pesquisas detalhadas e exaustivas sobre um ou mais objetos para permitir um conhecimento amplo e detalhado, bem como a lógica de planejamento, coleta e análise de dados. Para Gil (1999), os exemplos mais típicos desse tipo de pesquisa são os levantamentos ideológicos, ou estudos que se propõem a analisar diferentes posicionamentos sobre uma determinada questão.

O trabalho atual também inclui a pesquisa bibliográfica, pois se baseia em diversos livros, dissertações, teses, artigos e pesquisas na internet, e tem como objetivo enriquecer teoricamente o estudo proposto. A análise e compreensão dos parâmetros do ciclo a vapor (Rankine), o sistema híbrido usando coletores solares além do processo de dessalinização, ainda é um estudo

de caso, onde observações e melhores detalhamentos são feitos para que o pesquisador possa apresentar seu ponto de vista sem interferir no objeto a ser estudado.

3.2 Materiais e Métodos

Para o presente trabalho é necessário um estudo bibliográfico a fim de apresentar o equacionamento para determinação do poder calorífico inferior da biomassa nas proximidades das cidades do estudo de caso. Além disso, o estudo bibliográfico é importante para o equacionamento e a modelagem dos principais parâmetros intervenientes na determinação da eficiência térmica do ciclo analisado, geração de eletricidade no mesmo. O estudo descreve e detalha os principais componentes do ciclo híbrido em questão, que são: coletor solar, turbina, trocador de calor bomba, turbina, caldeira, condensador.

A Figura 16 mostra o fluxograma deste trabalho.

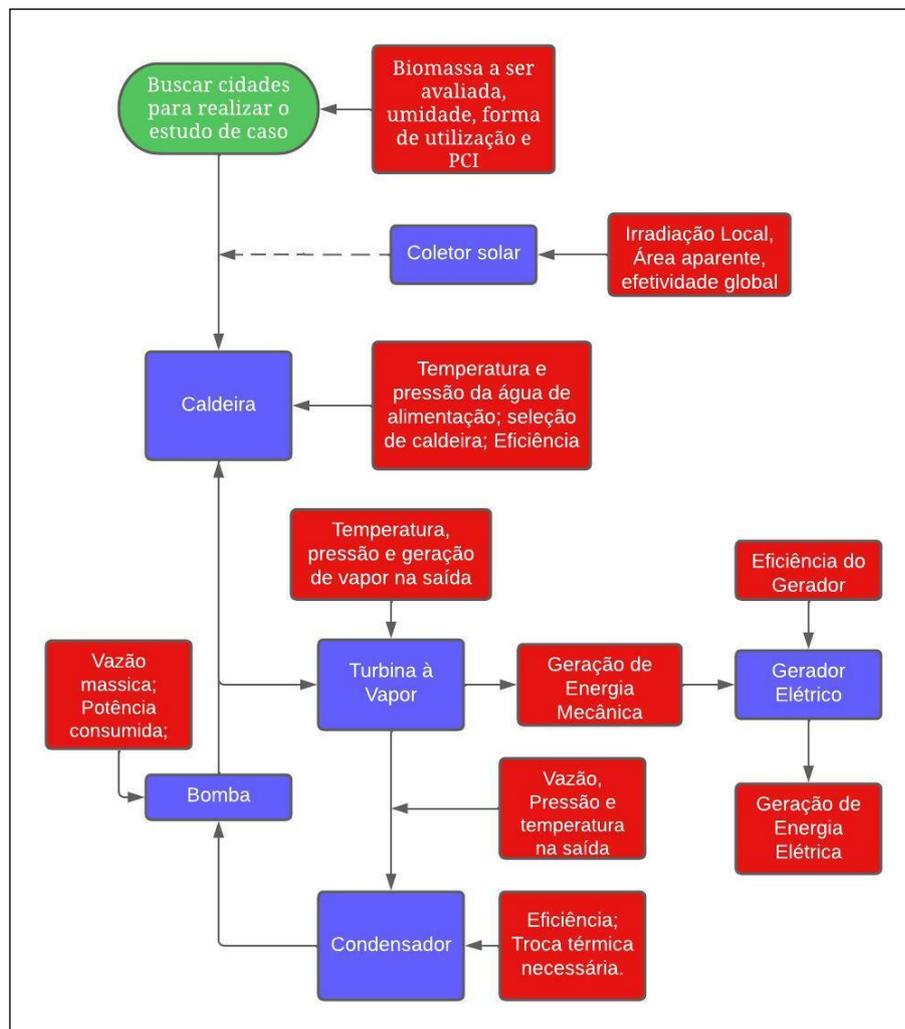


Figura 15: Fluxograma de atividades do presente trabalho
Fonte: Pesquisa direta (2022)

Como visto pela figura 16, o primeiro passo para realizar este estudo é encontrar cidades com produção da biomassa de interesse, a fim de buscar uma viabilização de estudo na região encontrada. Após escolhida as cidades base para estudo, busca-se conhecer a composição da biomassa a ser estudada, assim como sua umidade, a sua forma de utilização e o PCI.

Na análise da caldeira consideram-se como conhecidas as seguintes variáveis: temperatura e pressão da água que entra na caldeira; temperatura e pressão do vapor que sai da caldeira; perda de pressão e eficiência da caldeira; poder calorífico inferior e vazão mássica da biomassa a ser utilizada.

É feita uma análise do coletor solar colocando-o anterior à caldeira, servindo como um pré-aquecedor da água de alimentação e analisando a redução do consumo de combustível. Nessa etapa são conhecidas as seguintes variáveis: multiplicador solar, irradiação, área aparente do coletor, reflexividade do espelho, condutividade térmica do coletor, ângulo azimutal e ângulo de inclinação.

Para as turbinas a vapor do ciclo Rankine, busca-se uma modelagem e equacionamento para calcular o trabalho e a potência gerada através da aplicação da primeira e segunda lei da termodinâmica em regime estacionário no volume de controle. Esse procedimento é importante pois determina a melhor condição de operação, de forma que a temperatura máxima de entrada da turbina não exceda os valores imposto pelas condições metalúrgicas do material de fabricação da turbina. São conhecidas nesta etapa as seguintes variáveis: temperatura e pressão do vapor que entra na turbina; pressão do vapor que sai da turbina e eficiência isentrópica.

O equacionamento do condensador permite a determinação da troca térmica realizada entre a água de refrigeração e o vapor que sai da turbina. São conhecidas nesta etapa as variáveis: temperatura, pressão e título do vapor; temperatura e pressão da água de refrigeração na entrada e saída do equipamento; capacidade calorífica dos fluidos e efetividade de troca térmica.

Depois de efetuada a modelagem, obtém-se a partir dos resultados os gráficos desejados com o *software Excel*, e posteriormente é realizada a análise dos resultados obtidos.

3.3 Variáveis e Indicadores

Segundo Gil (1999) pode-se dizer que variável é qualquer coisa que pode ser classificada em duas ou mais categorias. É uma medida ou classificação, uma quantidade que

varia, um conceito operacional que apresenta ou contém valores, propriedade, aspecto ou fator, identificado em um objeto de estudo e passível verificação.

Para o estudo e medição de cada variável, existem alguns indicadores que são selecionados de acordo com os objetivos da pesquisa, sendo classificados de forma qualitativa ou quantitativa. Referente às definições apresentadas e os objetivos do trabalho, são separadas as variáveis e indicadores, segundo mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Variáveis e Indicadores de Pesquisa

Variáveis	Indicadores
Ciclo híbrido	<ul style="list-style-type: none"> • Coletores solares • Caldeira de biomassa • Turbina • Condensador • Bombas
Eficiência do ciclo híbrido	<ul style="list-style-type: none"> • Composição e vazão mássica da biomassa • Irradiância solar • Potência fornecida pela turbina • Eficiência dos coletores solar
Ciclo Rankine	<ul style="list-style-type: none"> • Composição e vazão mássica da biomassa • Variáveis operacionais de cada equipamento • Pressão e Temperatura dos fluidos na Caldeira • Pressão e temperatura de operação dos fluidos no Condensador(es)
Coletores Solares	<ul style="list-style-type: none"> • Irradiação • Área Aparente do Coletor

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

3.4 Instrumento de coleta de dados

Nesta etapa, é realizada a coleta de dados sobre os temas discutidos, a fim de se obter o embasamento da pesquisa por meio da revisão bibliográfica. Conforme já mencionado, esta pesquisa é de natureza bibliográfica, quantitativa e descritiva. Portanto, todos os dados necessários à pesquisa são obtidos por meio de pesquisa bibliográfica, utilizando livros, teses, dissertações, catálogos e dados obtidos por empresas.

3.5 Tabulação de dados

A partir dos dados obtidos pela teoria, serão realizados cálculos no Excel, que permite maior facilidade na resolução dos cálculos, melhor visualização dos dados, e simulação dos ciclos propostos neste trabalho. Além de sua utilização para gerar gráficos, facilitando assim o entendimento e interpretação dos resultados. Além disso, será empregado o *software* Microsoft Word para relatar e discutir os resultados obtidos.

3.6 Considerações Finais do capítulo

Este capítulo mostra a classificação dos tipos de pesquisa envolvidos e apresenta as ferramentas e técnicas utilizadas para realizar este trabalho. Todos os materiais e métodos usados para conduzir pesquisas de forma eficaz também são discutidos, além de delimitar o campo de pesquisa e a forma de coleta e tabulação dos dados obtidos. No próximo capítulo, com base na modelagem matemática, são apresentados os resultados obtidos no estudo de caso, bem como os procedimentos de cálculo necessários para a obtenção do valor de eficiência, cujos resultados são discutidos.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados as áreas de estudo e os motivos para sua escolha, assim como alguns dados das regiões como a radiação solar incidente, as atividades econômicas principais e a produção local de biomassa.

4.1 Delimitação das áreas em estudo

Para realizar os estudos deste trabalho, a cidade de Natal, capital do Rio Grande do Norte, é uma das cidades escolhida para comparação de produção de energia elétrica. A cidade é escolhida devido ser uma cidade com alto grau de irradiação solar, possuir plantações de cana-de-açúcar nas proximidades e por ser um grande centro industrial no estado do Rio Grande do Norte. Natal possui uma população estimada de 896.708 pessoas e uma média salarial mensal equivalente a 3 salários mínimos para trabalhadores formais, de acordo com o IBGE (2021). Ainda de acordo com o mesmo instituto, o PIB *per capita* da cidade é de R\$ 28.113,21 com um Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) de 0,763. O turismo é a principal atividade econômica da região representando cerca de 65,5% do PIB, seguido pelo comércio com 21,1%, indústria com 13,2% e agropecuária com 0,2% do PIB municipal (IBGE, 2019).

De acordo com o *software* Potencial Solar – SunDATA v3.0, desenvolvido pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito – CRESESB, em parceria com o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL (2017), a Estação Nisia Floresta é mais próxima da cidade de Natal/RN, localizada na latitude 6,001° S e 35,149° O. O gráfico da Irradiação Solar no Plano Horizontal pode ser visto na Figura 17.

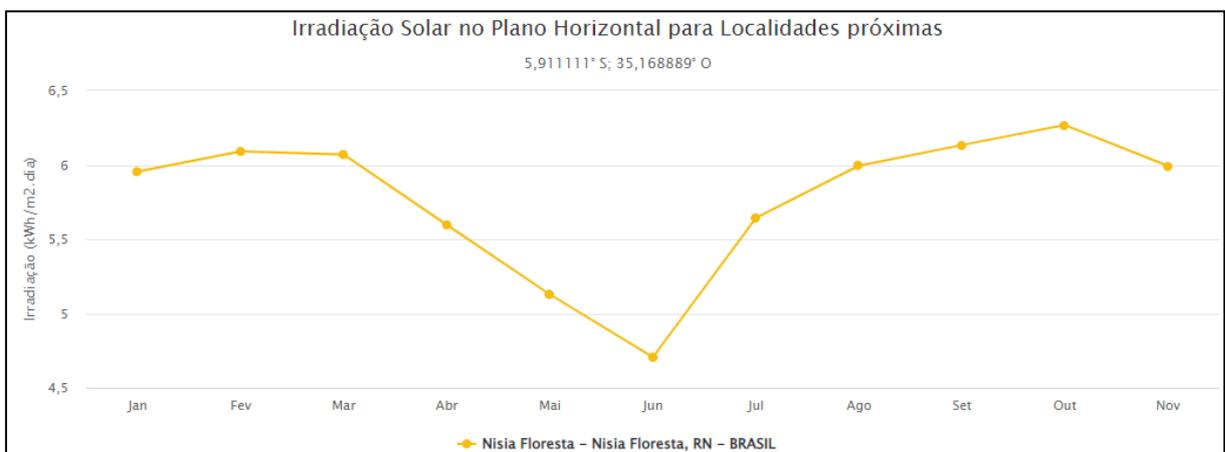


Figura 16: Irradiação solar no Plano Horizontal próximo a Natal/RN.
Fonte: CEPEL (2017).

Como pode-se observar na Figura 17, junho é o mês com menor incidência de Irradiação Solar, atingindo uma média de 4,71 kWh/m² por dia, sendo outubro o mês com maior média diária, chegando a 6,27 kWh/m² por dia. A média anual da Irradiação Solar Horizontal para o local é de 5,70 kWh/m² por dia (CEPEL, 2017).

Segundo dados disponibilizados pela Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2021), o estado do Rio Grande do Norte possui uma área de 38,7 mil hectares destinado ao plantio de cana-de-açúcar, com estimativa de produção de 2579,6 mil toneladas para a safra de 2021/22.

Segundo dados disponibilizados pela empresa Alfa Laval Aalborg (2022), o bagaço de cana-de-açúcar tem Poder Calorífico Inferior (PCI) equivalente, em média de 3200 kcal/kg, considerando um bagaço-de-cana com 20% de umidade. Para o bagaço-de-cana com umidade de 50%, o PCI é, em média, 1800 kcal/kg, ou 7534,8 kJ/kg.

Para efeitos de comparação, foi escolhida a cidade de Fortaleza, capital do Ceará. A cidade é um grande centro da região e os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados na cidade são utilizados como combustível. Fortaleza possui uma população estimada de 2.703.391 pessoas e uma média salarial mensal equivalente a 2,7 salários mínimos para trabalhadores formais, de acordo com o IBGE (2021). Ainda de acordo com o mesmo instituto, o PIB *per capita* da cidade é de R\$ 25.254,4 com um Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) de 0,754 (IBGE, 2019).

De acordo com o *software* Potencial Solar – SunDATA v3.0, desenvolvido pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito – CRESESB, em parceria com o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL (2017), a Estação Fortaleza é mais próxima da cidade de Fortaleza/CE, localizada na latitude 3,801° S e 38,549° O. O gráfico da Irradiação Solar no Plano Horizontal pode ser visto na Figura 18.

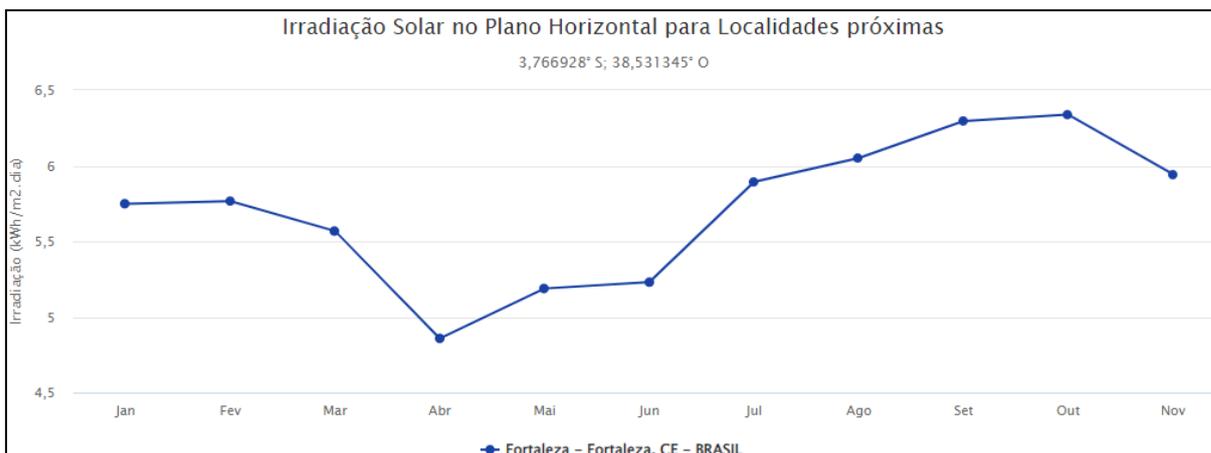


Figura 17: Irradiação solar no Plano Horizontal próximo a Fortaleza/CE.
Fonte: CEPEL (2017)

Como pode-se observar na Figura 18, abril é o mês com menor incidência de Irradiação Solar, atingindo uma média de 4,86 kWh/m² por dia, sendo outubro o mês com maior média diária, chegando a 6,34 kWh/m² por dia. A média anual da Irradiação Solar Horizontal para o local é de 5,69 kWh/m² por dia (CEPEL, 2017).

Segundo a Secretaria do Meio Ambiente (SEMA) do Governo do Estado do Ceará, através do Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (2018), a cidade de Fortaleza gerou em 2018 uma média de 3.552,88 t/dia de Resíduos de Sólidos Urbanos, com uma estimativa de 3.750,79 t/dia para 2022 e 3.959,72 t/dia para o ano de 2026. Ainda de acordo com o mesmo plano regional, existe na região sistemas de coleta e armazenamento que possibilita a separação dos resíduos, de modo a obter tipos de materiais que diferem pelo seu poder calorífico inferior, e conseguir viabilizar a utilização dos RSU em caldeira.

Para cálculo do PCI do RSU disponibilizado, a metodologia usada Carvalho (2016), que utiliza a porcentagem de material encontrado nos Resíduos Sólidos de Fortaleza. A média de material encontrado no RSU é um conjunto contendo 34,9% de resto de alimento, 7,9% de papel, 1,5% de vidro, 19,71% de plástico, 4% de produtos têxteis, 2% de madeira e 1% de borrachas e 28,99% de outros produtos que não agregam ao valor do PCI.

De acordo com a Tabela 3, disponibilizada pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE, 2014) em seu Inventário Energético dos Resíduos Urbanos, calcula-se o PCI de acordo com o material referido.

Tabela 3: Poder Calorífico dos materiais encontrados nos Resíduos Sólidos Urbanos

Material	PCI [kcal/kg]	% dos RSU de Fortaleza
Plásticos	6.301	19,71%
Borracha	6.780	1,00%
Couro	3.629	NA
Têxteis	3.478	4,00%
Madeira	2.520	2,00%
Alimentos	1.311	34,90%
Papel	4.033	7,90%

Fonte: EPE (2014) e Carvalho (2016)

A partir dos dados disponibilizados na Tabela 3, calcula-se o PCI, de acordo com a equação (19).

$$\begin{aligned}
 PCI &= (6301 \times 0,1971) + (6780 \times 0,01) + (3629 \times 0,0) + (3478 \times 0,04) \\
 &\quad + (2520 \times 0,02) + (1311 \times 0,349) + (4033 \times 0,079) \\
 &= \mathbf{2.275,39 \text{ kcal/kg}}
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

Obtêm-se um conjunto de materiais provenientes dos Resíduos Sólidos Urbanos da cidade de Fortaleza com um PCI equivalente a 2275,39 kcal/kg ou 9524,78 kJ/kg.

4.2 Resultado da análise energética dos ciclos propostos

A seguir, apresenta-se as análises energéticas dos ciclos, para as cidades de Natal/RN e Fortaleza/CE, comparando o ciclo base Rankine comum com o ciclo híbrido utilizando a energia solar térmica concentrada.

Para as análises considera-se que:

- Todos os processos termodinâmicos são considerados adiabáticos e em estado estacionário.
- A perda de calor e a queda de pressão nos tubos são insignificantes.
- As energias cinética e potencial dos componentes são insignificantes.
- Na entrada das bombas, o fluido é considerado um líquido saturado.

No presente estudo, buscou-se uma caldeira que tenha como combustível compatível o de bagaço-de-cana e o RSU. A Figura 19 demonstra uma caldeira *Pin Hole*, que pode ser usada nesta ocasião.

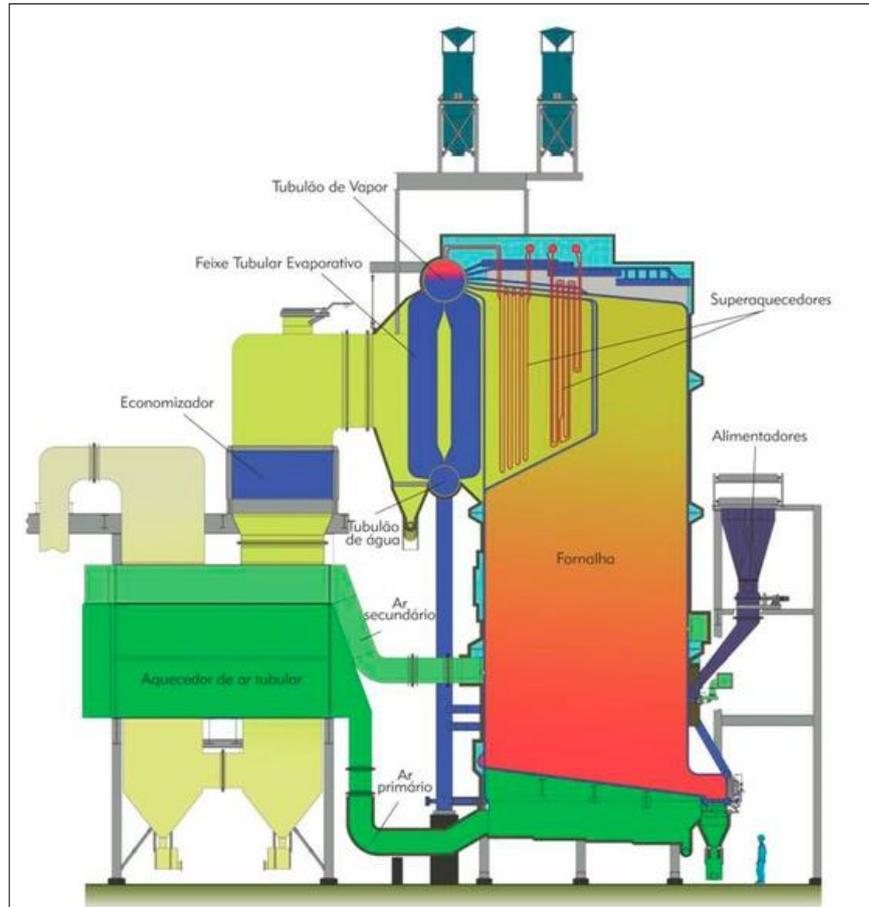


Figura 18: Caldeira *Pin Hole*
 Fonte: HPB (2015)

Conforme HPB (2015), em um caso de aplicação de sua caldeira *Pin Hole*, exemplificada na figura 19, que tem como possibilidade o uso de combustível tanto de bagaço-de-cana quanto de Resíduos Sólidos Urbanos. A caldeira possui uma vazão de vapor de até 250 t/h, pressão de operação de 67 bar, temperatura final do vapor de 490 °C e uma eficiência térmica de 87%.

A figura 20 ilustra o ciclo a vapor base (Ciclo Rankine) que será utilizado para comparação com a utilização do pré-aquecimento da água de alimentação da caldeira com o coletor solar térmico.

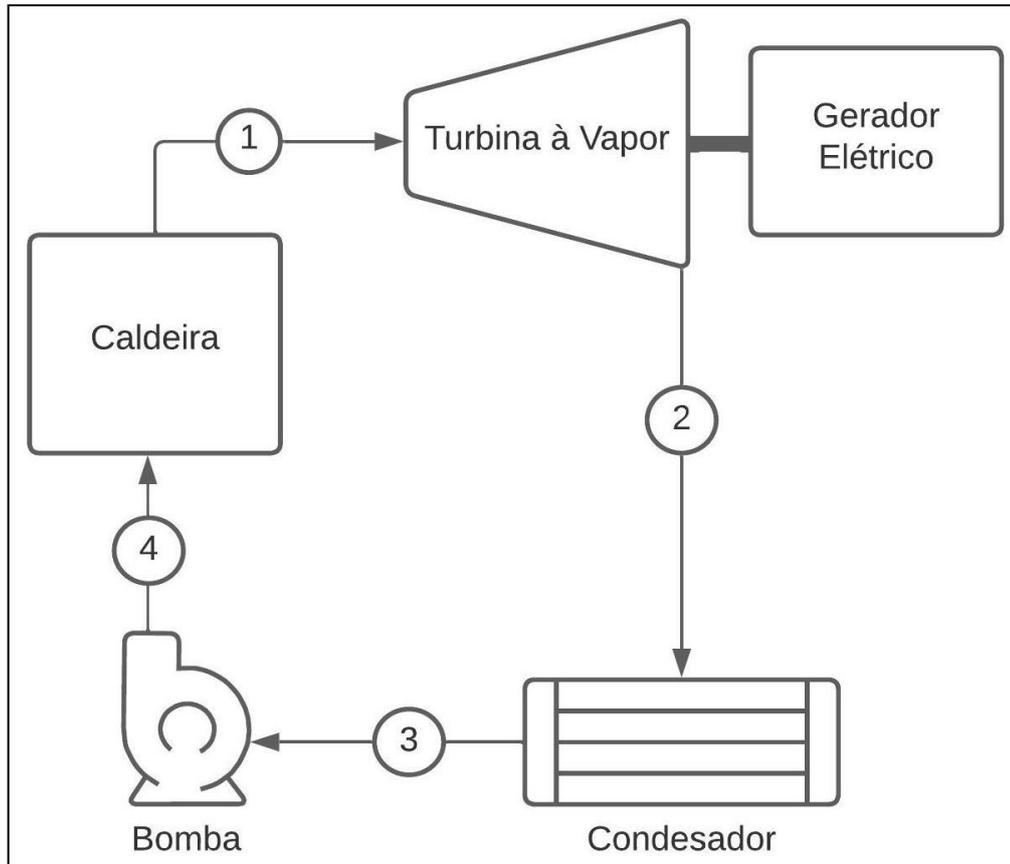


Figura 19: Ciclo Rankine Simples: Cenário Base
 Fonte: Pesquisa Direta (2022)

Como mostrado na figura 20, no processo 1-2, o vapor superaquecido pela caldeira é expandido através de uma turbina para gerar trabalho. Com esta expansão, tanto a pressão quanto a temperatura se reduzem. O vapor entra num condensador (Processo 2-3), onde é resfriado até a condição de líquido saturado. Em seguida, a água passa pelo processo 2-4, onde é bombeada de uma pressão baixa para uma pressão alta. E por fim, a água pressurizada entra numa caldeira (Processo 4-1), onde é aquecida até se tornar vapor superaquecido.

O segundo cenário utiliza o ciclo Rankine com pré-aquecimento. Esta estratégia busca promover a economia de combustível no processo. O sistema proposto consiste em uma caldeira, um trocador de calor acoplado ao coletor solar externo que pré-aquece a água de alimentação da caldeira usando a irradiação incidente, uma turbina de alta pressão, além de um condensador e uma bomba. Um esquema do ciclo Rankine no cenário modificado é apresentado na Figura 21.

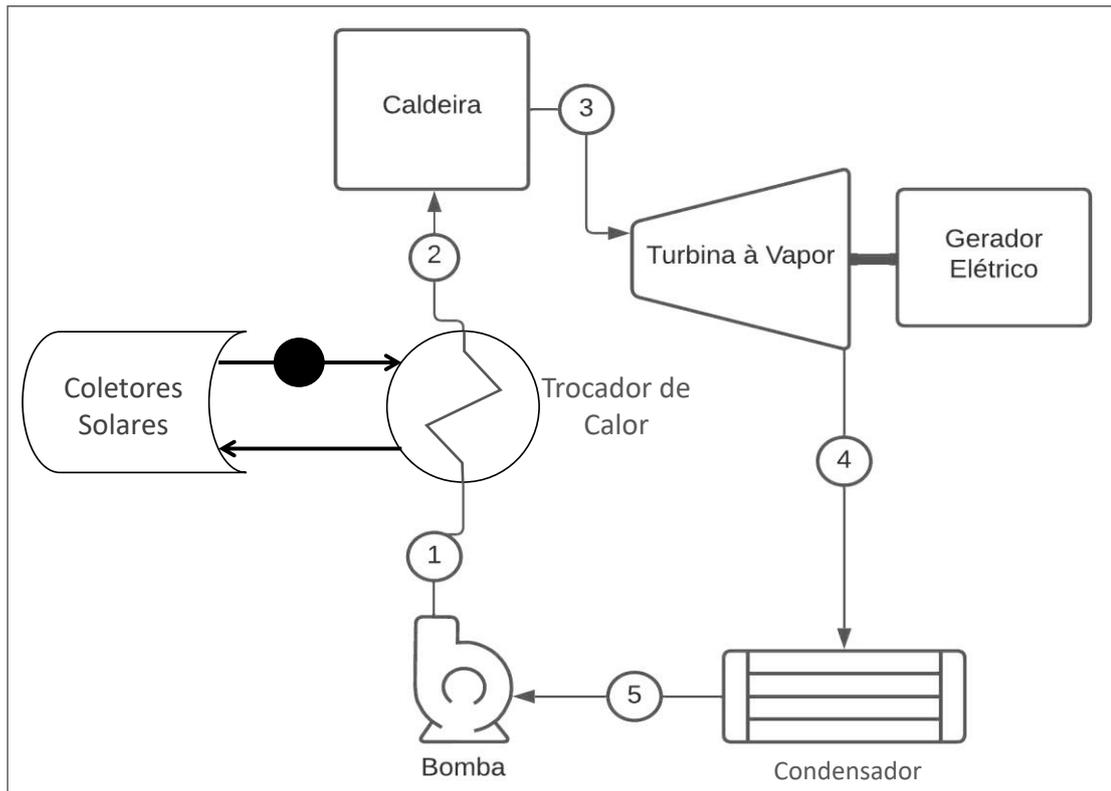


Figura 20: Ciclo Rankine com pré-aquecimento por coletores solares
 Fonte: Pesquisa Direta (2022)

Propõe-se dimensionar o campo de coletores solares com o intuito de aumentar a temperatura da água de alimentação da caldeira, de tal forma que seja consumido uma menor quantidade de combustível para gerar a mesma vazão de vapor que no cenário base do ciclo Rankine.

No processo 1-2, a água de alimentação tem sua temperatura aumentada ao passar por um trocador de calor que recebe energia térmica dos coletores solar. O fluido que passa pelo coletor solar é um óleo térmico que troca calor de forma indireta com a água de alimentação da caldeira. O fluido é superaquecido em uma caldeira (Processo 2-3). Posteriormente, é expandido através de uma turbina de alta pressão (Processo 3-4). O vapor entra no condensador (Processo 4-5), onde é resfriado até a condição de líquido saturado. Em seguida, a água passa pelo processo 5-1, onde é bombeada de uma baixa pressão para uma alta pressão e volta aos coletores solares.

Para este estudo, o modelo escolhido de coletor solar para as análises foi o *EuroTrough* ET100. A tabela 4 mostra alguns dados do modelo.

Tabela 4: Dados do coletor solar

Modelo <i>EuroTrough</i>	ET100
Distância focal	1,71 m
Abertura focal	5,77 m
Área do coletor	545 m ²
Comprimento do coletor	99,5 m
Número de espelhos	224
Número de tubos absorvedores (4,1)	24
Refletividade dos espelhos	94%
Peso da estrutura/m ² de coletor	19,0 kg
Eficiência global	75%

Fonte: Lüpfert et al, (2003).

Os coletores solares da *EuroTrough* utilizam óleo térmico. Neste trabalho pesquisou-se os dados do óleo XCEL THERM MK1 fabricado pela Radco, e a sua entalpia é calculada pela equação 20.

$$h = 0,0014T^2 + 0,6982T - 314,1 \quad (20)$$

Em que: T é a temperatura de operação do óleo térmico, em K. Segundo a *EuroTrough* (2001), os coletores ET-100 operam com as temperaturas que variam de 200 °C a 400 °C. Usando os valores informados, a variação de entalpia do óleo térmico será:

$$h_{e,TC} = 790,28 \frac{kJ}{kg} \quad e \quad h_{s,TC} = 329,67 \frac{kJ}{kg} \quad \therefore \quad \Delta h = 460,60 \frac{kJ}{kg}$$

4.2.1 Bagaço-de-cana em Natal/RN

De acordo com os dados disponibilizados pela CONAB (2021), a estimativa de produção de cana-de-açúcar no estado do Rio Grande do Norte é de 2.579,6 mil toneladas para a safra de 2021/22. Para cada tonelada de cana-de-açúcar, após sua utilização na indústria sucroalcooleira, 250 kg de bagaço-de-cana é disponibilizado, totalizando 644,9 mil toneladas de bagaço ofertado na safra de 2021/22 (CTC, 2017).

Considerando a usina em operação durante 24 horas por dia, 7 dias por semana e 48 semanas no ano, considerando 4 semanas para manutenção, tem-se uma disponibilidade de 79.972,72 kg/h de bagaço-de-cana.

O calor demandado ao coletor solar (\dot{Q}_{col}) para realizar o pré-aquecimento da água para abastecer a caldeira é determinado pela equação 21. Procura-se pré-aquecer a água de alimentação visando diminuir os custos de operação da planta, levando em consideração a temperatura em que a água começa a evaporar a pressão de 6,7 MPa (282,9 °C). Assim, admite-se que a água será pré-aquecida até 200 °C. A entalpia da água é obtida a partir das tabelas termodinâmicas do vapor, para a pressão de 6,7 MPa e para as temperaturas de 100 °C ($h_1 = 424,0 \text{ kJ/kg}$) e 200 °C ($h_2 = 854,6 \text{ kJ/kg}$).

$$\dot{Q}_{col} = \dot{m}_1(h_2 - h_1) = \frac{176400}{3600} (854,6 - 424) = 21.099,4 \text{ kW} \quad (21)$$

Em que: h_{2cs} é a entalpia do óleo térmico, em kJ/kg, a 200 °C e 6,7 MPa; e h_{1ck} é o valor da entalpia do óleo térmico a 100 °C.

Para o valor da incidência de irradiação solar (DNI), escolheu-se o mês com maior média diária na região, e o valor foi dividido por 10 horas solares para obter o valor médio de incidência de irradiação solar direta, como observa-se na equação 22.

$$DNI = \frac{6270 \text{ Wh/m}^2}{10 \text{ h}} = 627 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (22)$$

A área do campo solar (A_{CS}) é definida, de acordo com a equação 23. Considera-se o valor de $\cos(\theta) = 1$ pois o modelo *EuroTrough* ET100 é do tipo *full tracking*, ou seja, a incidência solar será sempre perpendicular ao coletor solar (POSSATTO, 2017). A eficiência global do coletor é de $\eta_{global} = 0,75$.

$$A_{CS} = \frac{Q_{col}}{\eta_{global} \times DNI \times \cos(\theta)} = \frac{21099400}{0,75 \times 627 \times 1} = 44868,5 \text{ m}^2 \quad (23)$$

Como a área necessária não é um múltiplo exato da área de cada coletor *EuroTrough*, propõe-se o uso de 83 coletores, totalizando uma área refletora de 45235 m².

Após a tabulação dos dados em arquivo do *Excel*, os resultados para o sistema híbrido são resumidos na tabela 5.

Tabela 5: Dados para análise energética dos ciclos para a cidade de Natal a partir do bagaço-de-cana

Dados	Valor (Ciclo de base)	Valor (Ciclo com Energia Solar Térmica)
Consumo de Combustível	79,97 t/h	Entre 66,36 e 79,97 t/h
PCI do bagaço-de-cana	7531,2 kJ/kg	7531,2 kJ/kg
Irradiação solar direta	-	627 W/m ²
Área do Coletor Solar	-	45235 m ² ou 4,52 hectares
Produção de vapor	176,4 t/h	176,4 t/h
Pressão de entrada na Turbina	6,7 MPa	6,7 MPa
Pressão de saída na Turbina	100 kPa	100 kPa
Temperatura de Vapor	490 °C	490 °C
Temperatura de água de alimentação da caldeira	100 °C	200 °C
Eficiência da caldeira	87%	87%
Pressão Ambiente	101,3 kPa	101,3 kPa
Eficiência da Turbina	0,85	0,85
Potência gerada pela Turbina	38,59 MW	38,59 MW
Eficiência global do Sistema	26,24%	Entre 26,24% e 52,11%

Fonte: Pesquisa direta (2022).

A Figura 22 apresenta as variações na geração de potência térmica na caldeira, $\dot{Q}_{caldeira}$, e dos coletores solar, \dot{Q}_{col} , ao longo do dia no qual foi especificado o ponto de projeto.

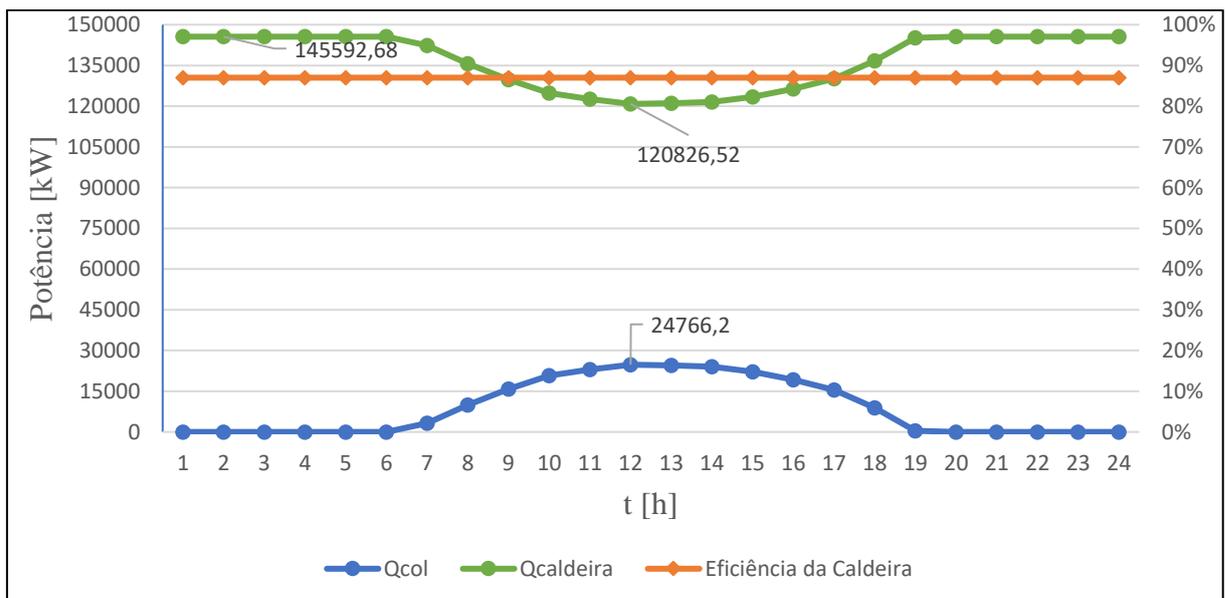


Figura 21: Potências térmicas da caldeira e dos coletores solares.

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Como indicado na Figura 22, a operação dos coletores solares em série com a caldeira não reduz sua carga, portanto para o modelo adotado, a eficiência da caldeira permanece constante.

A eficiência global do ciclo híbrido é calculada de acordo com a equação 24.

$$\eta_{g,híbrido} = \frac{W_{turbina} + W_{bomba}}{DNI \times A_{CS} \times (PCI \times \dot{m}_{comb})} \quad (24)$$

O consumo de combustível no sistema híbrido, aproveitando a energia térmica solar para pré-aquecer a água varia de acordo com a disponibilidade dos raios solares ao longo do dia. A figura 23 apresenta as variações do consumo de biomassa e da eficiência global do sistema ao longo do dia no qual foi especificado o ponto de projeto.

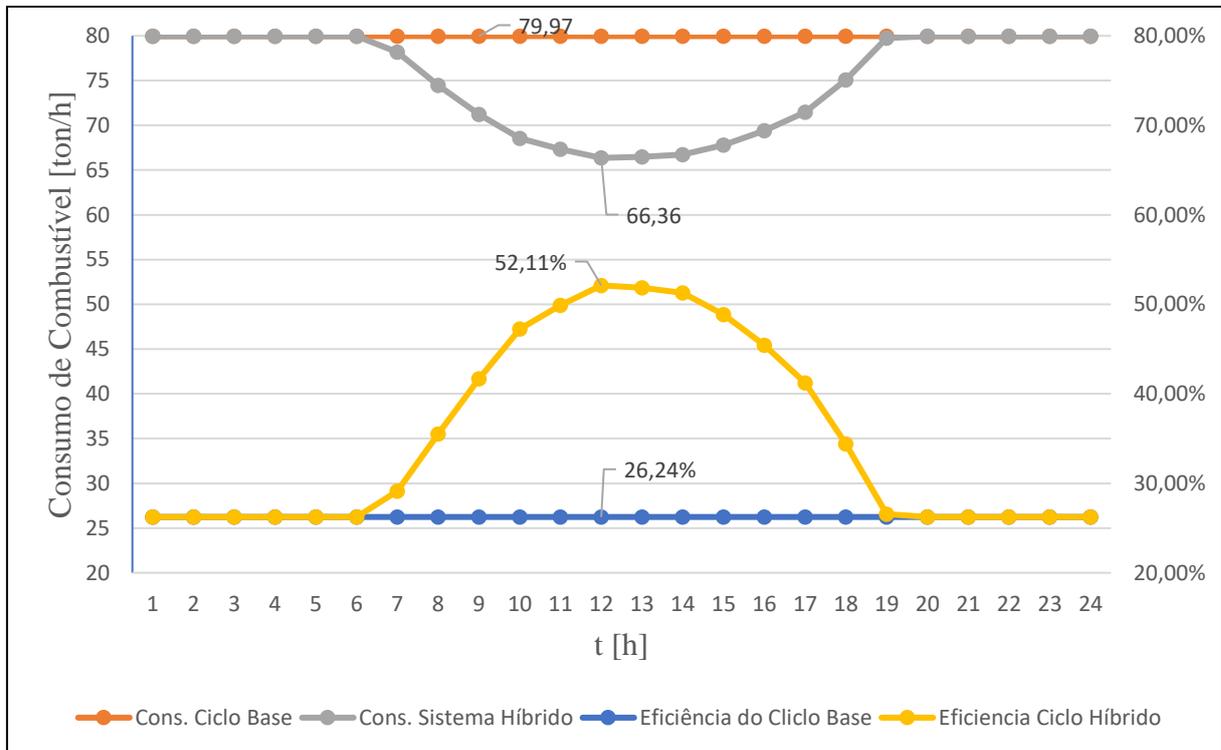


Figura 22: Consumo de combustível e Eficiência dos ciclos
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Como pode-se observar na Figura 23, o consumo de combustível é reduzido em aproximadamente 13 t/h no ponto de maior economia. Percebe-se um grande aumento na eficiência térmica, devido a utilização dos coletores com fonte de energia gratuita, substituindo o uso da cana-de-açúcar durante o período de incidência solar.

4.2.2 Resíduos Sólidos Urbanos em Fortaleza/CE

Para a cidade de Fortaleza/CE, toma-se como base para os cálculos a geração de RSU estimada para o ano de 2022, que, segundo a Secretaria do Meio Ambiente – SEMA do Governo do Estado do Ceará, através do Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (2018), é de 3.750,79 t/dia para 2022.

Considerando o mesmo tempo de operação para a usina de Natal/RN, tem-se uma disponibilidade de 156,28 t/h de RSU. Devido ao limite de vapor gerado pela caldeira ser de 250 t/h, limitou-se o consumo de combustível para uma vazão mássica de RSU de 89,64 t/h, caso contrário excederia o limite de operação da caldeira.

O calor demandado ao coletor solar, Q_{col} , para realizar o pré-aquecimento da água para abastecer a caldeira é determinado na equação 25. Assim como nos coletores da cidade de Natal, o coletor irá pré-aquecer a água de alimentação da caldeira através de um trocador de calor até uma temperatura de 200 °C.

$$Q_{col} = \dot{m}_1(h_{2cs} - h_{1ck}) = \frac{250000}{3600} (854,6 - 424) = 29.895,8 \text{ kW} \quad (25)$$

Em que: h_{2cs} é a entalpia do óleo térmico, em kJ/kg, a 200 °C e 6,7 MPa; e h_{1ck} é o valor da entalpia do óleo térmico a 100 °C.

Para o valor a incidência, escolheu-se o mês com maior média diária na região, e o valor foi dividido por 10 horas solares para obter o valor médio de incidência de irradiação solar direta.

$$DNI = \frac{6340 \text{ Wh/m}^2}{10 \text{ h}} = 634 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

A área de abertura do campo solar é definida, de acordo com a equação 26. A eficiência global do coletor é de $\eta_{global} = 0,75$.

$$A_{CS} = \frac{Q_{col}}{\eta_{global} \times DNI \times \cos(\theta)} = \frac{29895800}{0,75 \times 634 \times 1} = 62.870,2 \text{ m}^2 \quad (26)$$

Como a área necessária não é um múltiplo exato da área de cada coletor *EuroTrough*, propõe-se para a cidade de Fortaleza, o uso de 116 coletores, totalizando uma área refletora de 63.220 m².

Após a tabulação dos dados em arquivo do *Excel*, os resultados para o sistema híbrido em Fortaleza, utilizando RSU como combustível, são resumidos na tabela 6.

Tabela 6: Dados para análise energética dos ciclos para a cidade de Fortaleza a partir do RSU

Dados	Valor (Ciclo de base)	Valor (Ciclo com Energia Solar Térmica)
Consumo de Combustível	89,64 t/h	Entre 74,47 e 89,64 t/h
PCI do RSU de Fortaleza	9524,78 kJ/kg	9524,78/kg
Irradiação solar direta	-	634 W/m ²
Área do Coletor Solar	-	63220 m ² ou 6,32 hectares
Produção de vapor	250 t/h	250 t/h
Pressão de entrada na Turbina	6,7 MPa	6,7 MPa
Pressão de saída na Turbina	100 kPa	100 kPa
Temperatura de Vapor	490 °C	490 °C
Temperatura de água de alimentação da caldeira	100 °C	200 °C
Eficiência da caldeira	87%	87%
Pressão Ambiente	101,3 kPa	101,3 kPa
Eficiência da Turbina	0,85	0,85
Potência gerada pela Turbina	54,68 MW	54,68 MW
Eficiência global do Sistema	26,24%	Entre 26,24% e 51,69%

Fonte: Pesquisa direta (2022).

A Figura 24 apresenta as variações na geração de potência térmica na caldeira, $\dot{Q}_{caldeira}$, e dos coletores solar, \dot{Q}_{col} , ao longo do dia no qual foi especificado o ponto de projeto para a cidade de Fortaleza.

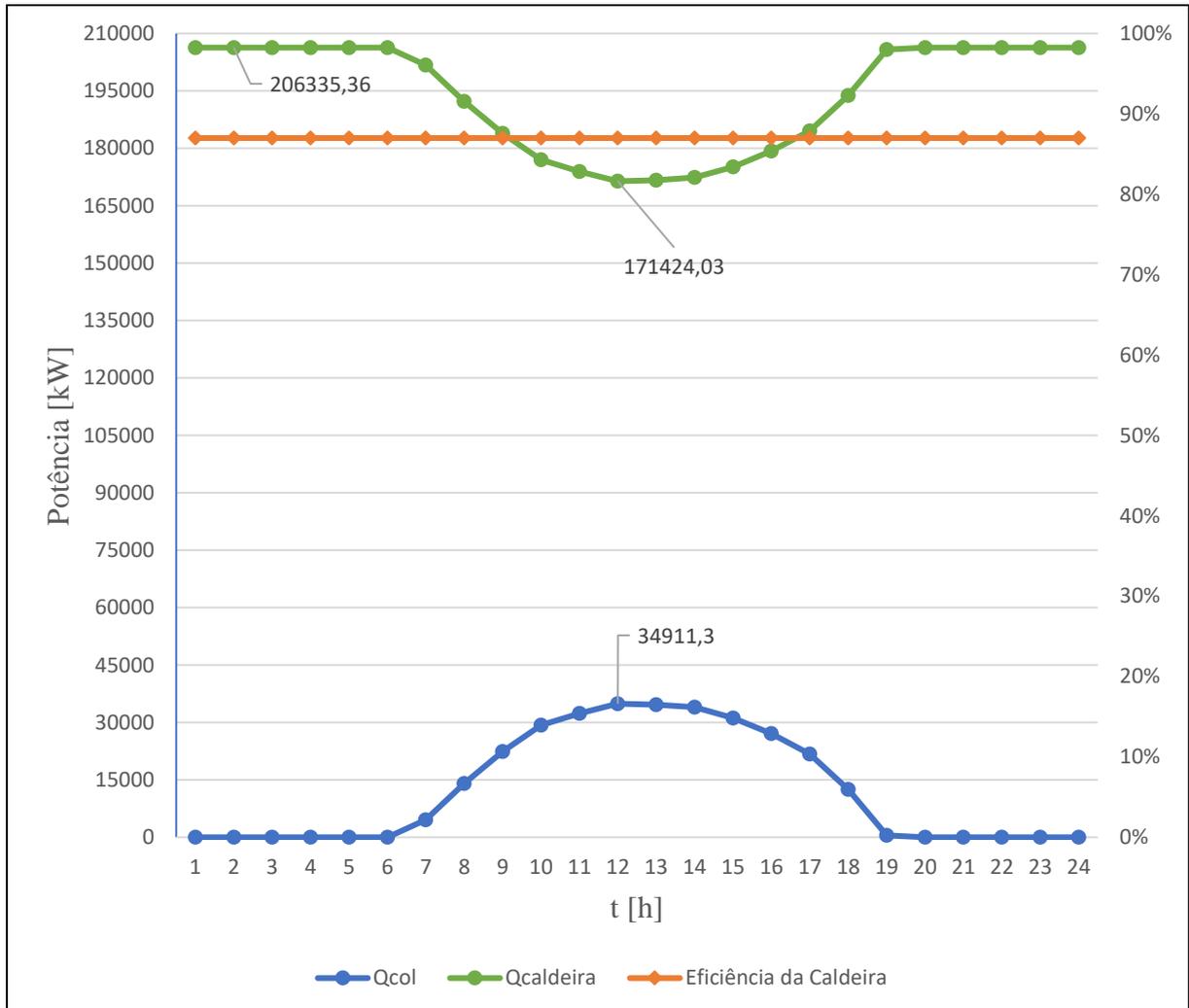


Figura 23: Potências térmicas da caldeira e dos coletores solares na cidade de Fortaleza.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Como indicado na Figura 24, assim como exemplificado na cidade de Natal, a operação dos coletores solar em série com a caldeira não reduz sua carga, portanto para o modelo adotado, a eficiência da caldeira permanece constante.

A figura 25 apresenta as variações do consumo de biomassa e da eficiência global do sistema ao longo do dia no qual foi especificado o ponto de projeto na cidade de Fortaleza.

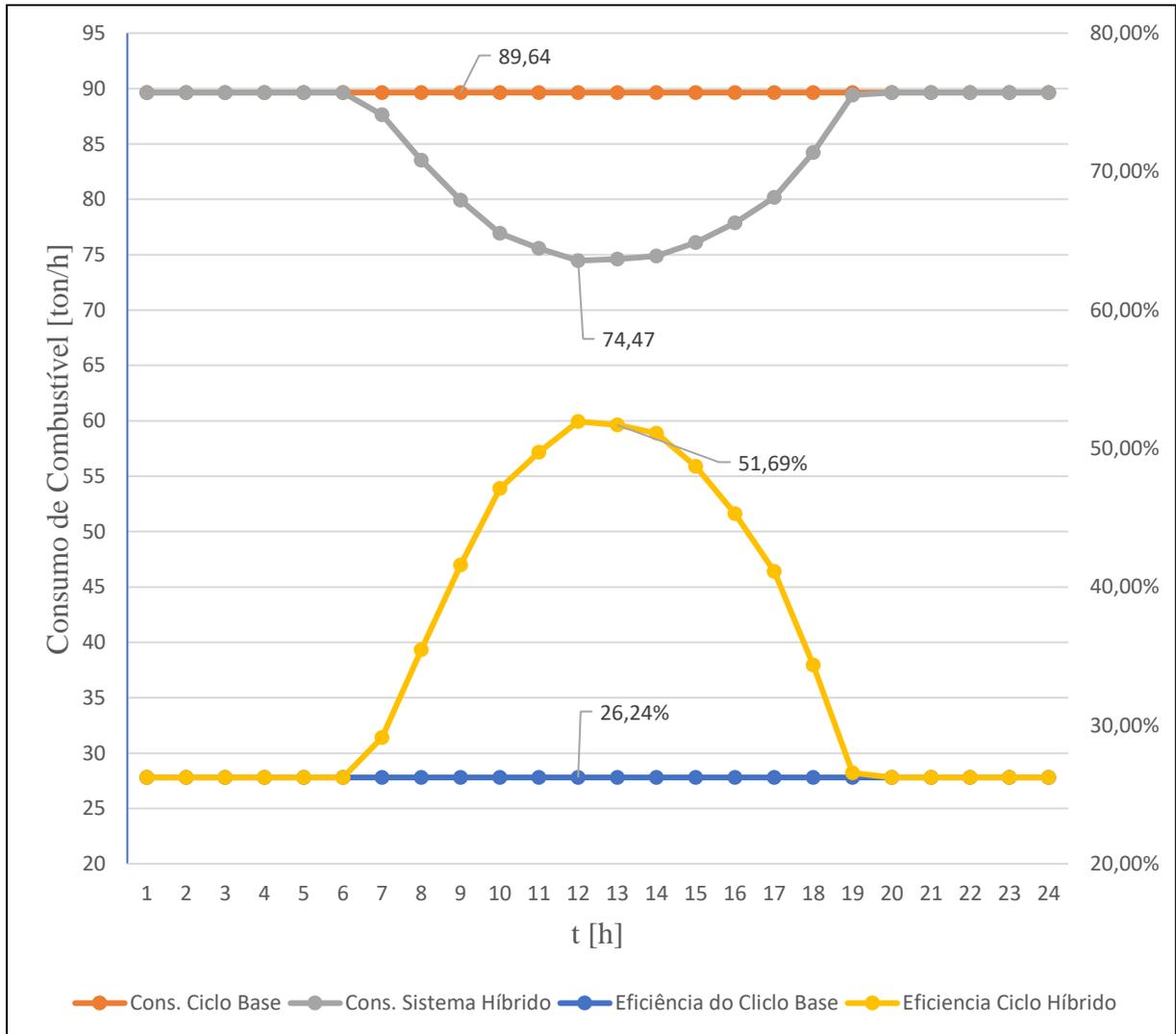


Figura 24: Consumo de combustível e Eficiência dos ciclos na cidade de Fortaleza.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Como pode-se observar na Figura 25, o consumo de combustível é reduzido em aproximadamente 15 t/h no ponto de maior economia. Assim como em Natal, percebe-se um grande aumento na eficiência térmica, devido a utilização dos coletores com fonte de energia gratuita, substituindo o uso da cana-de-açúcar durante o período de incidência solar.

4.3 Comparação

Algumas comparações podem ser feitas a partir da análise dos sistemas proposto em cada cidade. A tabela 7 demonstra alguns dados que são importantes para analisar.

Tabela 7: Comparação de resultados entre as cidades de Natal e Fortaleza

Dado	Natal	Fortaleza
Consumo de combustível no Ciclo Base	79,97 t/h	89,64 t/h
Economia máxima de combustível	13 t/h	15 t/h
Número de coletores solar	83	116
Área ocupada pelos coletores	4,52 ha	6,32 ha
Potência gerada pela turbina	38,59 MW	54,68 MW

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Como pode-se observar na tabela 7, o número de coletores solar necessário para o sistema proposto em Fortaleza é quase o dobro necessário para a cidade de Natal, fazendo com que aumente bastante a área ocupada e o investimento para compra do material necessário. Em compensação, pela quantidade de RSU disponível em Fortaleza, assim como maior PCI do combustível, a potência gerada na turbina é de 15,77 MW a mais que a gerada na cidade de Natal.

5 CONCLUSÕES E RECOMENÇÕES

O presente capítulo apresenta as conclusões tomadas a partir dos resultados obtidos. Posteriormente são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

Neste trabalho é possível verificar a viabilidade técnica do uso de biomassa de bagaço-de-cana e resíduos sólidos urbanos como combustível em uma caldeira de incineração *Pin Hole*. Para isto, precisa-se analisar os principais elementos que compõem cada biomassa com o intuito de revelar a quantidade de calor liberado em cada uma. As biomassas analisadas são o bagaço de cana e os resíduos sólidos urbanos. O estudo também leva em consideração o coletor solar Eurotrough ET100. Após a coleta de dados como a irradiação solar incidente nas cidades de Natal/RN e Fortaleza/CE, a produção e o poder calorífico inferior da biomassa disponível, dimensiona-se a área necessária para elevar a temperatura da água de alimentação de 100°C para 200°C. O resultado é comparado com um ciclo base sem os coletores. O consumo de combustível diminui em 13 t/h para a cidade de Natal e 15 t/h para a cidade de Fortaleza, considerando o horário de maior incidência solar. A disponibilidade de biomassa, assim como o potencial de energia solar disponível na região favorece a implantação de sistemas híbridos combustível/solar, representando uma boa alternativa para uma maior diversificação da matriz energética nacional.

Pode-se entender como grande benefício para a sociedade a utilização da energia heliotérmica, dando suporte a este setor, gerando empregos nas etapas de fabricação, transporte e instalação dos coletores solar, além de incentivar que novas pesquisas sejam realizadas com o intuito de desenvolver a tecnologia, aumentando sua eficiência e diminuindo os custos necessários.

Em relação ao meio ambiente, deve-se levar em consideração a redução do consumo de combustíveis, diminuindo a emissão de gases poluentes na atmosfera, oriundos da combustão.

O potencial de geração de energia elétrica pelo processo de queima de biomassa depende do poder calorífico do combustível, o que pode determinar a viabilidade técnica do empreendimento. As características do resíduo sólido como combustível, demonstrou ser mais viável para a geração de energia elétrica, pois, além de possuir maior PCI que o bagaço-de-cana, tem maior disponibilidade entre as cidades estudadas.

O presente trabalho apresenta algumas limitações devido às simplificações adotadas para a estruturação dos modelos apresentados. Uma das principais hipóteses adotadas se refere em avaliar o ciclo termodinâmico considerando que as transferências de calor ocorridas nas caldeiras, nos coletores solar e no condensador ocorressem à pressão constante.

Portanto, conclui-se que usar coletores solar é uma forma eficiente de reduzir o consumo de combustível de uma caldeira à biomassa, podendo trazer grandes benefícios para a geração de energia elétrica.

5.2 Recomendações

Sugere-se como trabalhos futuros:

- Um estudo mais detalhado em relação as perdas de carga que o fluido de trabalho sofre no escoamento através das tubulações dos trocadores de calor;
- A análise econômica do empreendimento, levando em consideração o custo de implementação de cada ciclo, além do potencial retorno financeiro que se pode obter;
- Estudo da redução de gases poluentes devido à redução de consumo de combustível na caldeira;
- Estudo da inserção de um sistema de dessalinização para geração de água dessalinizada;
- Avaliação de outras tecnologias de concentração de calor;
- A análise da inserção de concentradores solar em diferentes pontos do sistema, verificando o melhor posicionamento em relação a eficiência global.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. Atlas de energia elétrica do Brasil. Brasília, 2008.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. Ministério de Minas e Energia. Relatório. Brasília, 2021.

BIZZO, Waldir A. Geração, Distribuição e Utilização de Vapor. Campinas: Unicamp, 2003. Disponível em: <https://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP2.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2022.

BORDIGNON, Simone. Dessalinização da água do mar como alternativa para obtenção de água potável. 2016. 37 f. Dissertação (Pós-graduação em Economia e Meio Ambiente) – Departamento de Economia Rural e Extensão, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

BRAND, M A; Hanne, R A; SCHAIN, V A S; PEREIRA, E R. Mapeamento dos problemas associados à geração e tratamento das cinzas na combustão da biomassa florestal em caldeira. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 1167-1192, jul./set. 2021.

CARVALHO, Maria Laudecy Ferreira de. Produção de resíduos sólidos em fortaleza – Ceará: desafios. Revista Educação Ambiental, [s. l.], 9 set. 2016. Disponível em: <https://www.revistaea.org/artigo.php?idartigo=2420>. Acesso em: 6 maio 2022.

ÇENGEL, Y A; BOLES, M A. Termodinâmica. 7ª ed Porto Alegre: AMGH, 2013.

ÇENGEL, Y.A.; GHAJAR, A.J. Transferência de Calor e Massa – Uma abordagem prática, 4ª ed. Porto Alegre: McGrall-Hill, 2012.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA (Brasil); LINERO, Francisco Antio Barba. Aproveitamento da Palha de Cana: Desafios, Benefícios e Perspectivas. Seminário Internacional de Logística Agroindustrial, Piracicaba, 10 abr. 2017. Disponível em: <https://esalqlog.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/2017/SILA14/Francisco%20Antio%20Barba%20Linero.pdf>. Acesso em: 12 maio 2022.

CEPEL - CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). CRESESB. Potencial Solar - SunData v3.0. Rio de Janeiro: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito, 2017. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>. Acesso em: 11 abr. 2022.

CERVO, Armando Luiz et al. Metodologia Científica. 6ª Edição. ed. São Paulo: Pearson, 2006. 167 p.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTCIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, Brasília, DF, v. 8, n. 3, novembro 2021.

DOMINGUES, Marcela A. Análise Exergética de uma Planta de Cogeração Híbrida Solar/Biomassa. 2020. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2020.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, Willian A. Solar engineering of thermal processes. United States: A Wiley Interscience, 1991.

EUROTROUGH COLLECTOR QUALIFICATION COMPLETE: PERFORMANCE TEST RESULTS FROM PSA. In: LÜPFERT, Eckhard et al. *EUROTROUGH COLLECTOR QUALIFICATION COMPLETE*. [S. l.], 2003. Disponível em: https://elib.dlr.de/99768/1/EuroTrough_Ises2003_O523_final_.pdf. Acesso em: 17 maio 2022.

EUROTROUGH. *Development of a Low Cost European Parabolic Trough Collector. Non Nuclear Energy Programme*, [s. l.], Janeiro 2001. Disponível em: https://cordis.europa.eu/docs/projects/files/JOR/JOR3980231/51762451-6_en.pdf. Acesso em: 23 maio 2022.

FERREIRA, Eduardo M. Síntese otimizada de sistemas de cogeração e dessalinização. 2008. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

GIL, Antônio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. São Paulo: Atlas, 1999.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. Secretaria do Meio Ambiente - SEMA. PLANO REGIONAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS: Região Metropolitana de Fortaleza A, Fortaleza, 2018. Disponível em: <https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2018/12/PLANO-RMF-A.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2022.

GUARDABASSI, Patrícia Maria. Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia perspectivas para países em desenvolvimento. São Paulo, 2006. 126p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

HADDAD J. et al. Conservação de Energia Elétrica: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos 2 a edição. Itajubá: FUPAI, 2001. 467p.

HASSUANI, S.; REGIS, M.; CARVALHO, I. *Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash*. Piracicaba: CTC-PNUD, 2005. 217 p. Disponível em: <<https://www.yumpu.com/en/document/read/37155496/biomass-power-generationsugar-cane-bagasse-sucre-ethique> >. Acesso em: 25/11/2020.

HPB (Sertãozinho). Casos: Usina da Mata. Sertãozinho, Maio de 2015. Disponível em: <https://www.hpb.com.br/casos/usina-da-mata/>. Acesso em: 12 maio 2022.

IBGE, Cadastro Central de Empresas 2019. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Estimativas da população residente com data de referência 1o de julho de 2021.

INCROPERA, F.P.; WITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.S. 1992

KALOGIROU, Soteris. Solar energy engineering: processes and systems. United States: Elsevier, 2009.

KHOSRAVI A, SYRI S, ZHAO X, ASSAD MEH. *An artificial intelligence approach for thermodynamic modeling of geothermal based-organic Rankine cycle equipped with solar system*. Geothermic Jul. 2019.

KHOSRAVI, A et al. *Optimal technology for a hybrid biomass/solar system for electricity generation and desalination in Brazil*. *ScienceDirect*, Finlândia, v. 234, n. 1, novembro, 2021.

Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221015577?via%3Dihub>>.

Acesso em: 15/11/2021.

LODI, Cristiane. *Perspectivas para a Geração de Energia Elétrica no Brasil Utilizando a Tecnologia Solar Térmica Concentrada*. 2011. 127 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MARTINS, Roberto de Andrade. *A análise geométrica da duração dos dias, no tratado sobre a esfera de sacrobosco*. *Anais do V Seminário Nacional de História da Matemática*, p. 165-81, 2013.

MILLER, A., LUMBY, B. *Utility Scale Solar Power Plants: A Guide for Developers and Investors*. *International Finance Corporation*, 2012. Disponível em:

<[https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/fe79dd27-5c9d-4cb0-8dc-](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/fe79dd27-5c9d-4cb0-8dc-000e54073aa87/SOLAR%2BGUIDE%2BBOOK.pdf?MOD=AJPERES&CVID=jrR7UB7)

[000e54073aa87/SOLAR%2BGUIDE%2BBOOK.pdf?MOD=AJPERES&CVID=jrR7UB7](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/fe79dd27-5c9d-4cb0-8dc-000e54073aa87/SOLAR%2BGUIDE%2BBOOK.pdf?MOD=AJPERES&CVID=jrR7UB7)>.

Acesso em: 20/11/2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). *Empresa de Pesquisa Energética - EPE. RECURSOS ENERGÉTICOS. Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos*, Rio de Janeiro, outubro 2014. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2018%20-%20Inventário%20Energético%20de%20Resíduos%20Sólidos%20Urbanos%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2022.

NOGUEIRA, Luiz A. H. et al. *Conservação de Energia: Eficiência Energética de equipamentos e instalações*. 3ª Edição. Itajubá: FUPAI, 2006.

OYAMA, A C. Análise de processo em caldeiras da indústria sucroenergética. Monografia (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia. 91 páginas. 2017

PÁSCOA, José C. Turbomáquinas: Uma Abordagem moderna. Porto: Publindústria, 2017. 274 p.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHAR, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>. Acesso em: 20/11/2021.

PHILIBERT, C., FRANKL, P., DOBROTKOVA, Z. Technology roadmap: Concentrating Solar Power. Internacional Energy Agency (IEA), 2010.

POSSATTO, Benhur. Sistema híbrido de geração de potência: Pl. 2017. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Energia) - UNILA, Foz do Iguaçu, 2017.

REIS, Lineu Belico dos. Geração de Energia Elétrica. 2ª Edição. São Paulo: Editora Manole, 2011.

RENDEIRO, Gonçalo et al. Combustão e Gaseificação de Biomassa Sólida. 1ª Edição. ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. 192 p. ISBN 978-85-98341-05-7.

SARKAR DK. Steam power plant cycles. In: Thermal power plant. Elsevier; 2015. p. 1e37.

SCHLECHT, M., MEYER, R. *Site selection and feasibility analysis for concentrating solar power (CSP) systems*. LOVEGROVE, K.; STEIN, W. Concentrating solar power technology. Cambridge, UK: Woodhead, 2012. Cap. 4.

SILVA, C. R. O. Metodologia do trabalho científico. Fortaleza: Centro Federal e Educação Tecnológica do Ceará, 2004.

SILVA, Marcelo Bacci; MORAIS, Anderson dos Santos. Avaliação Energética do Bagaço de Cana em Diferentes Níveis de Umidade e Graus de Compactação. A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável. Rio de Janeiro, 16 out. 2008.

TEIXEIRA, T. R. C. Estudo de um sistema híbrido com colectores solares termo-fotovoltaicos acoplados a um termogenerador eléctrico. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.

UNESCO. World Water Assessment Program. O valor da água: Fatos e dados. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos, Perúgia, Itália, 2021.

WAKIL SHAHZAD, M., BURHAN, M., SOO SON, H., JIN OH, S., CHOON N G, K. (2018). *Desalination processes evaluation at common platform: A universal performance ratio (UPR) method. Applied Thermal Engineering*, 134, 62–67. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018