



**UFPE**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO VICTOR SIQUEIRA TENÓRIO SILVA

## **SIMULAÇÃO DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA COMBINADA DE UMA PLANTA HELIOTÉRMICA NO AGRESTE PERNAMBUCANO**

Recife-PE

2025



CARACTERIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS, ENERGIAS RENOVÁVEIS  
E BIOTECNOLOGIA AMBIENTAL

Apoio



Gestão



JOÃO VICTOR SIQUEIRA TENÓRIO SILVA

**SIMULAÇÃO DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA COMBINADA DE UMA  
PLANTA HELIOTÉRMICA NO AGRESTE PERNAMBUCANO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em  
Engenharia Mecânica da Universidade Federal de  
Pernambuco como requisito para a obtenção do título  
de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Orientador, Dr. André Felipe  
Vieira da Cunha

Recife-PE

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, João Victor Siqueira Tenório.

Simulação da produção energética combinada de uma planta heliotérmica no  
agreste pernambucano / João Victor Siqueira Tenório Silva. - Recife, 2025.  
42 : il., tab.

Orientador(a): André Felipe Vieira Cunha

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de  
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica -  
Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices, anexos.

1. Energia solar concentrada. 2. Cogeração. 3. Ciclo Rankine orgânico. 4.  
Calor no processo industrial. 5. Beneficiamento do jeans. 6. Eficiência  
energética. I. Cunha, André Felipe Vieira. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

JOÃO VICTOR SIQUEIRA TENÓRIO SILVA

**SIMULAÇÃO DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA COMBINADA DE UMA  
PLANTA HELIOTÉRMICA NO AGRESTE PERNAMBUCANO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em  
Engenharia Mecânica da Universidade Federal de  
Pernambuco como requisito para a obtenção do título  
de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Orientador, Dr. André Felipe  
Vieira da Cunha

**Aprovada em: 09/04/2025.**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**André Felipe Vieira da Cunha/  
UFPE**

---

**Janaina Moreira de Meneses/  
UFPE**

---

**Marcele Elisa Fontana/  
UFPE**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho de conclusão de curso. Sem o apoio, incentivo e colaboração de diversas pessoas, este momento não teria sido possível. Primeiramente, agradeço imensamente aos meus pais, que sempre foram minha maior fonte de inspiração e motivação. Agradeço pelo amor incondicional, pelo suporte em todas as etapas da minha vida e pela confiança que depositaram em mim. Vocês são os pilares que me sustentam e sem a presença de vocês, nada disso teria sido possível.

Aos meus familiares, que estiveram ao meu lado em cada momento de luta e conquista, muito obrigado. Suas palavras de encorajamento e sua presença foram fundamentais para que eu pudesse seguir em frente, sempre com coragem e determinação. A minha namorada, agradeço por sua paciência, amor e apoio contínuo. Em cada desafio, você esteve ao meu lado, me oferecendo forças para seguir, e sua compreensão foi essencial para o meu bem-estar durante toda essa jornada.

Ao meu orientador, Professor André Felipe Vieira da Cunha, expressei minha profunda gratidão pela orientação e apoio técnico e acadêmico. Sua expertise, paciência e comprometimento foram essenciais para a realização deste trabalho. Agradeço também pela confiança depositada em mim e por me guiar ao longo deste processo.

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, à Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, por meio do Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP/FINEP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP Nº 50/2015. Em particular ao PRH 48.1 “Caracterização e Simulação de Reservatórios, Energias Renováveis e Biotecnologia Ambiental” (PROCESSOS ANP Nº48610.201019/2019-38 e FAPESP Nº2024/10544-2), sediado no Departamento de Energia Nuclear do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, pelo apoio financeiro.

## RESUMO

O calor no processo industrial representa uma parte significativa da demanda energética de setores como têxtil, alimentos e bebidas, sendo que parte específica dessa demanda é atendida por fontes térmicas não renováveis e poluentes. Em busca de soluções sustentáveis e eficientes, este trabalho propôs uma planta solar de coletores parabólicos operando em modo de cogeração, com o objetivo de atender tanto à demanda térmica quanto à demanda elétrica de indústrias, especialmente aquelas que operam em faixas de temperatura médias e baixas ( $<250^{\circ}\text{C}$ ). Uma planta solar foi modelada e simulada usando o software System Advisor Model (SAM) e o Engineering Equation Solver (EES), a fim de dimensionar um sistema heliotérmico capaz de fornecer calor de processo e eletricidade a uma planta de beneficiamento de jeans no agreste pernambucano. O estudo abordou o desempenho do ciclo Rankine Orgânico (ORC), para avaliar a previsão e a eficiência energética de cada configuração. Os resultados mostraram que o ciclo Rankine Orgânico, aliado ao calor residual do processo, gerou uma produção de energia elétrica de cerca de 1000 KW e 20 Kg/s água quente à  $70^{\circ}\text{C}$  para o beneficiamento do jeans.

**Palavras-chave:** Energia solar concentrada, cogeração, ciclo Rankine orgânico, calor no processo industrial, beneficiamento de jeans, eficiência energética.

## **ABSTRACT**

Heat in industrial processes represents a significant portion of the energy demand in sectors such as textiles, food, and beverages, with a specific part of this demand being met by non-renewable and polluting thermal sources. In search of sustainable and efficient solutions, this work proposed a solar plant with parabolic collectors operating in cogeneration mode, aiming to meet both the thermal and electrical demand of industries, especially those operating within medium and low temperature ranges ( $<250^{\circ}\text{C}$ ). A solar plant was modeled and simulated using the System Advisor Model (SAM) and the Engineering Equation Solver (EES) software, in order to design a heliothermal system capable of supplying process heat and electricity to a denim processing plant in the Agreste region of Pernambuco. The study addressed the performance of the Organic Rankine Cycle (ORC) to evaluate the forecast and energy efficiency of each configuration. The results showed that the Organic Rankine Cycle, combined with the residual heat from the process, generated an electrical power output of approximately 1000 kW and 20 kg/s of hot water at  $70^{\circ}\text{C}$  for denim processing.

**Keywords:** Solar energy, Cogeneration, Organic Rankine Cycle, Industrial process heat, denim processing, Energy efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa da Irradiação Direta Normal (DNI) no Brasil, média anual. ....	9
Figura 2 – Projetos Heliotérmicos no mundo. ....	11
Figura 3 – Esquema de uma planta CSP de calhas parabólicas. ....	12
Figura 4 – Sistema de coletores utilizando torre central. ....	13
Figura 5 – Concentrador disco parabólico. ....	14
Figura 6 – Fresnel linear compacto. ....	15
Figura 7 – - Ciclo Rankine simples ideal. ....	20
Figura 8 – Esquema do sistema de produção combinada. ....	23
Figura 9 – Fluxograma dos procedimentos utilizados nesse trabalho. ....	25
Figura 10 – - Mapa de Irradiação solar direta normal (DNI)–faixa acima de 6,0 kWh/m <sup>2</sup> /dia. ....	26
Figura 11 – - Produção de energia elétrica. ....	34
Figura 12 – - Produção de água quente. ....	35

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Tipos de materiais utilizados em armazenamento com calor sensível.....	17
Tabela 2 – Temperatura e tempo por procedimentos de lavagem no beneficiamento do jeans.	22
Tabela 3 – Características geométricas e óticas do coletor LS-2.....	29
Tabela 4 – Características do Receptor Solel UVAC 3.....	30
Tabela 5 – Dados de entrada para simulação em Surubim-PE .....	32
Tabela 6 – Eficiências isoentrópicas dos componentes dos ciclos de potência.....	33

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	7
1.1	OBJETIVOS . . . . .	8
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .	9
2.1	RADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL . . . . .	9
2.2	ENERGIA HELIOTÉRMICA . . . . .	10
2.3	TIPOS DE CONCENTRADORES DE ENERGIA SOLAR . . . . .	11
2.3.1	Calha Parabólica.....	11
2.3.2	Torre Central .....	12
2.3.3	Dico Parabólico .....	13
2.3.4	Fresnel Linear.....	14
2.4	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO TÉRMICO . . . . .	15
2.5	CONVERSÃO ENERGÉTICA . . . . .	15
2.5.1	Ciclo Rankine Orgânico .....	17
2.6	BENEFICIAMENTO DO JEANS . . . . .	20
3	METODOLOGIA .....	22
3.1	PROPOSTA DE TRABALHO . . . . .	23
3.2	SAM . . . . .	24
3.3	ESCOLHA DA LOCALIDADE . . . . .	25
3.4	FLUIDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR . . . . .	27
3.5	COLETORES PARABOLICOS . . . . .	27
3.6	RECPETORES . . . . .	28
3.7	OUTROS PARÂMETROS DE ENTRADA . . . . .	28
3.7.1	Projeto do Sistema (Parâmetros das condições nominais de projeto).....	28
3.7.2	Campo Solar (Parâmetros do Campo e do Fluido Térmico) . . . . .	29
3.8	MODELAGEM DO ORC . . . . .	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
4.1	PRODUÇÃO DE ENERGIA ELETRICA . . . . .	32
4.2	PRODUÇÃO DE ÁGUA QUENTE . . . . .	33
5	CONCLUSÕES.....	34
	REFERÊNCIAS .....	36

## 1 INTRODUÇÃO

Em 2023, a oferta interna de energia no Brasil totalizou 313,9 MWt, refletindo um crescimento de 3,5% em comparação ao ano anterior. A participação das fontes renováveis na Oferta Interna de Energia (OIE) manteve-se elevada, alcançando 49,1%. O setor industrial somente foi responsável por consumir 31% de toda energia no país, com um aumento de 2,9% em relação ao ano de 2022. Onde 64,7% dessa energia é oriunda de fontes renováveis. Isso demonstra que o país tem iniciativas inovadoras para a transição energética através da incorporação de novas fontes renováveis em sua matriz energética (Empresa De Pesquisa Energética-EPE, 2023).

Ademais, a demanda energética na indústria representa um desafio significativo e impulsionador na busca por soluções mais sustentáveis e eficientes. A combinação de fontes renováveis como a solar com sistemas de cogeração desponta como uma estratégia viável para atender essa demanda crescente e diminuir a dependência dos combustíveis fósseis (Zhang; Zhaohua; Wang, 2017). A integração de fontes de energia renováveis, como a solar, com sistemas de cogeração de energia emerge como uma estratégia promissora para atender a essa demanda crescente e reduzir a dependência de combustíveis fósseis (Abdelhady *et al.*, 2015).

No Brasil, os sistemas de energia solar (CSP) ainda estão em fase inicial de implementação. Embora existam algumas usinas operacionais dedicadas à geração de energia e à pesquisa, além de outras em construção, sua adoção permanece limitada devido ao elevado custo dessa tecnologia. Entretanto, a implementação do CSP oferece vantagens como o uso de uma fonte abundante e gratuita de energia, além da possibilidade de armazenar energia na forma térmica (Coventry; Andraka, 2017). Isso contribui para diversificar a matriz energética e reduzir as emissões de gases do efeito estufa. Na região do agreste pernambucano, onde há abundância de recursos solares disponíveis, integrar sistemas solares térmicos com cogeração pode não apenas fornecer calor e eletricidade de forma eficiente, mas também diminuir consideravelmente o consumo de combustíveis fósseis e as emissões de CO<sub>2</sub>. Além disso, essa abordagem permite otimizar o uso da energia captada garantindo uma energia fornecida e confiável à indústria local essencial ao desenvolvimento econômico da região.

Desse modo, espera-se que esta pesquisa contribua para definir os aspectos fundamentais relacionados à instalação de uma planta heliotérmica no agreste pernambucano. Será inicialmente especificada uma localização mais adequada para sua implantação; posteriormente será escolhido o tipo ideal de concentrador solar em conformidade com as condições regionais; além disso será modelado um sistema de cogeração integrando va-

---

riáveis críticas à eficiência energética. Por fim, o modelo desenvolvido por simulações e otimizações visa maximizar sua capacidade produtiva.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é simular uma planta heliotérmica visando a otimização da captação de energia solar para geração de energia elétrica e calor de processo para atender a demanda de um processo industrial.

Como objetivos específicos pode-se citar:

- Definir a localização ideal para a implantação da planta heliotérmica, levando em consideração fatores climáticos, geográficos e de infraestrutura.
- Escolher o concentrador solar mais eficiente para maximizar a captação de energia.
- Modelar o sistema de cogeração para integrar eletricidade e calor de forma eficiente e sustentável.
- Simular e otimizar a produção energética para alcançar máxima eficiência operacional.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Este estudo é motivado pela necessidade crescente de sistemas tecnológicos que utilizem fontes renováveis para melhorar a produção energética em áreas com alto potencial solar. Assim sendo, este trabalho se propõe simular e melhorar a produção energética combinada em uma planta heliotérmica situada no agreste pernambucano. Serão realizadas avaliações que consideraram diversas variações teóricas e práticas que visam garantir um uso mais eficiente dos recursos solares disponíveis.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 POTENCIAL DE APROVEITAMENTO SOLAR NO BRASIL

O Brasil possui uma vasta extensão territorial caracterizada por grande diversidade geográfica e climática. Apesar da maioria do território receber irradiação solar direta normal (DNI) anual superior a 1700 kWh/m<sup>2</sup>, é no Nordeste onde se encontram áreas com os índices mais elevados superando os 2000 kWh/m<sup>2</sup> anualmente. Essas áreas localizadas predominantemente na parte oeste da Bahia e sul do Piauí conforme ilustrado na Figura 1, extraída da empresa (Solargis, et. al 2021).

Figura 1 – Mapa da Irradiação Direta Normal (DNI) no Brasil, média anual.



Fonte: Solargis (2021).

De acordo com Staley et al. (2009), a irradiância solar direta normal (DNI – *Direct Normal Irradiance*) mínima recomendada para a viabilidade de um sistema de geração de energia elétrica utilizando energia solar concentrada é de 5,5 kWh/m<sup>2</sup>/dia. Considerando esse valor ao longo de um ano, obtém-se um total aproximado de 2.000 kWh/m<sup>2</sup>/ano. Portanto essas áreas do nordeste brasileiro tem um alto potencial de aproveitamento para energia solar concentrada.

## 2.2 ENERGIA HELIOTÉRMICA

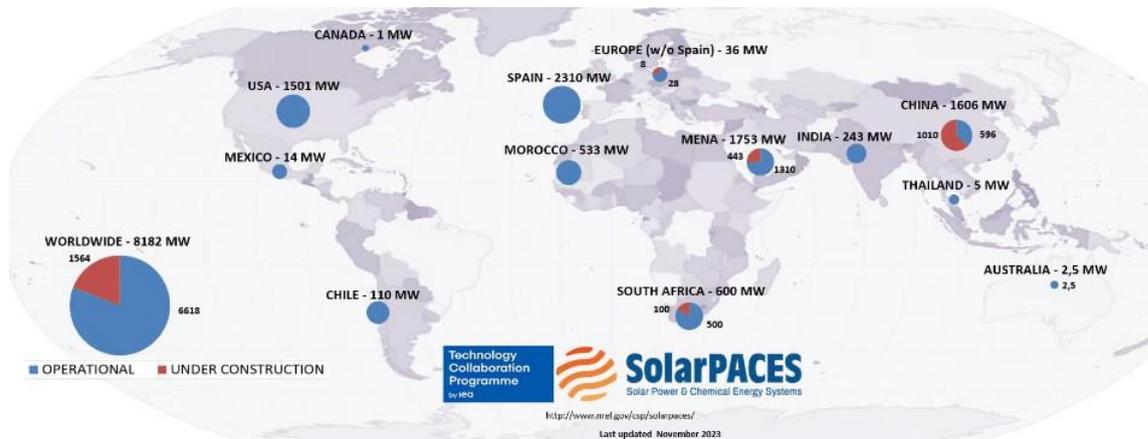
A energia heliotérmica, utiliza concentradores, como os coletores parabólicos, para capturar e concentrar a radiação solar. Esses concentradores, compostos por espelhos parabólicos, refletem e focam a luz solar em um tubo receptor central, onde o calor é transferido para um fluido térmico, como água ou óleo térmico. Este fluido aquecido pode ser utilizado diretamente em processos industriais ou para gerar eletricidade através de um ciclo térmico. Um dos principais desafios desses sistemas é a necessidade de dispositivos de rastreamento solar, que aumentam a eficiência e a temperatura alcançada, mas também elevam os custos de instalação e operação. Alternativamente, sistemas estacionários, que não acompanham o movimento do sol, podem ser mais simples e econômicos, embora com menor eficiência óptica. Os coletores parabólicos, especialmente em configurações simplificadas que minimizam a complexidade e os custos, são uma solução promissora para aplicações de temperatura média em indústrias agropecuárias, onde a facilidade de operação é crucial (Barbosa *et al.*, 2020).

O componente mais importante de qualquer sistema heliotérmico é o coletor solar, que absorve a radiação solar incidente, a converte em calor, e transfere esse calor para um fluido térmico que passa pelo coletor. A energia térmica coletada é transportada do fluido do coletor direto para a água do ciclo termodinâmico, sendo assim o fluido térmico transfere calor para o ciclo Rankine e é recirculado no sistema para ser reutilizado (Kalogirou, 2023).

No que se refere aos coletores solares, são comumente utilizadas tecnologias solares planas para aplicações de baixa temperatura, até 100°C. Para temperaturas superiores, empregam-se tecnologias de concentração de energia solar, conhecidas como Concentrated Solar Power (CSP). Os quatro tipos principais de sistemas CSP são: coletores cilindro- parabólicos, torre central, discos parabólicos e concentradores de Fresnel linear. Cada uma dessas tecnologias concentra a radiação solar para atingir altas temperaturas, sendo utilizadas para geração de energia em grande escala (Coventry; Andraka, 2017).

A capacidade instalada de plantas heliotérmicas ainda é limitada e concentrada em poucos países. Segundo Wordbank (2020), há aproximadamente 9,3 GW de projetos heliotérmicos em todo o mundo, como mostrado na Figura 2. Desses, cerca de 6,0 GW estão em operação, com 2,3 GW na Espanha, 1,7 GW nos Estados Unidos, 0,53 GW no Marrocos, 0,5 GW na China e 0,5 GW na África do Sul. O restante está principalmente localizado no Oriente Médio e no Norte da África.

Figura 2 – Projetos Heliotérmicos no mundo.



Fonte: SolarPaces (2023).

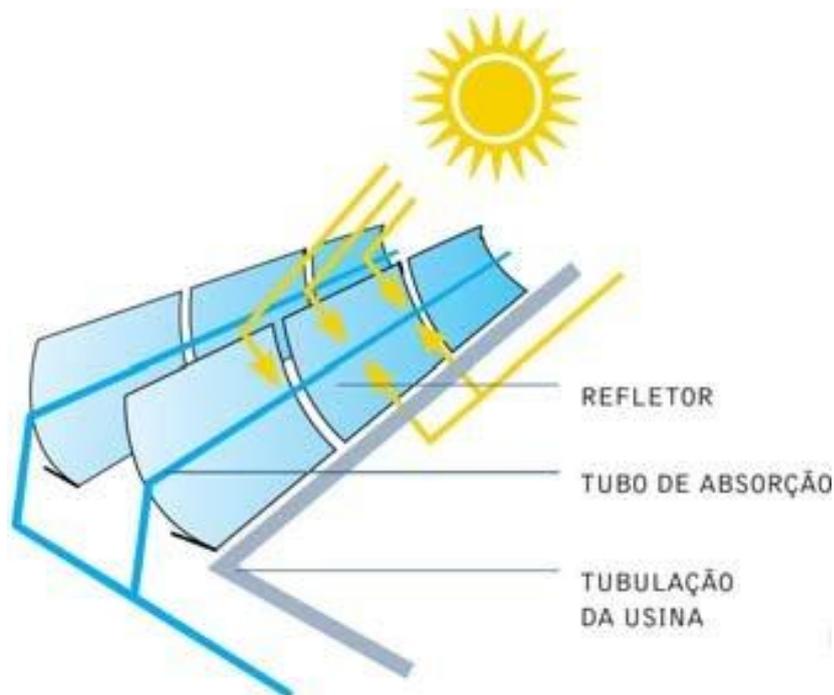
Na Figura 2, observa-se que a capacidade operacional global é de 6.618 MW, com mais 1.564 MW em construção. A Espanha lidera com 2.310 MW em operação, seguida pelos Estados Unidos (1.501 MW), China (1.606 MW), Marrocos (533 MW) e África do Sul (600 MW). Regiões como o Oriente Médio e Norte da África (MENA) também apresentam capacidades significativas, enquanto países como Chile, México, Índia e Austrália possuem capacidades menores. A figura ainda destaca a distribuição entre capacidade operacional (em azul) e em construção (em vermelho), indicando as regiões com maior crescimento no setor heliotérmico. Recentemente, novos projetos CSP em Dubai e na Austrália comunicaram um recorde de baixas tarifas de eletricidade abaixo de 0,07 USD por kWh, o que seria capaz de marcar o avanço comercial da tecnologia CSP no mundo (HACHICHA, 2019).

## 2.3 TIPOS DE CONCENTRADORES DE ENERGIA SOLAR

### 2.3.1 Calha Parabólica

Os coletores parabólicos em calha, também conhecidos como concentradores cilíndrico- parabólicos, permitem o alcance de temperaturas que chegam a 400°C, sendo amplamente utilizados em processos industriais e geração de eletricidade. Esses dispositivos consistem em uma superfície refletora curvada em formato parabólico, com a função de concentrar a radiação solar incidente em uma linha focal. Ao longo dessa linha, posiciona-se um tubo receptor, como mostrado na Figura 3, geralmente feito de metal com alta condutividade térmica e revestido com um material seletivo que maximiza a absorção da energia solar. Para reduzir as perdas de calor por convecção e radiação, o tubo metálico é envolto por um tubo de vidro selado a vácuo, formando uma barreira térmica altamente eficiente. Além disso, a calha parabólica permite o rastreamento uniaxial do sol, maximizando a captação de energia ao longo do dia. A orientação dos coletores pode ser leste-oeste, que coleta mais energia no inverno, ou norte-sul, mais eficiente durante o verão. Desenvolvimentos recentes buscam melhorar a eficiência desses sistemas, como a criação de estruturas mais leves e mecanismos automatizados de limpeza dos refletores, o que reduz os custos de manutenção e aumenta a durabilidade dos equipamentos (Kalogirou, 2016).

Figura 3 – Esquema de uma planta CSP de calhas parabólicas.



Fonte: IEA (2010).

### 2.3.2 Torre Central

As torres solares representam uma tecnologia CSP que utiliza um vasto campo de heliostatos dispostos ao redor de uma torre central, geralmente cobrindo grandes áreas. Esses sistemas possuem uma razão de concentração que varia entre 300 e 1500 vezes, permitindo que alcancem temperaturas operacionais de até 2000°C (Simões-Moreira, 2021). Os heliostatos são equipados com sistemas de rastreamento solar, garantindo que os raios solares refletidos sejam continuamente direcionados ao receptor no topo da torre, como ilustrado na Figura 4.

Nesse receptor, sais fundidos absorvem o calor, que é então transferido por meio de tubulações para aquecer a água e gerar vapor em altas pressões. O vapor produzido é utilizado para movimentar uma turbina conectada a um gerador elétrico, resultando na produção de energia. Os espelhos dos heliostatos podem ser planos ou levemente curvados, conforme o projeto (Ledesma *et al.*, 2016).

Figura 4 – Sistema de coletores utilizando torre central.



Fonte: Scalco (2016).

### 2.3.3 Dico Parabólico

O coletor disco parabólico é uma tecnologia de concentração solar de alta eficiência, capaz de atingir temperaturas superiores a 1000°C. Esse sistema utiliza uma superfície refletora em formato de disco parabólico, que concentra a radiação solar em um ponto focal, onde é posicionado um receptor, como ilustra a Figura 5.

Além de sua alta capacidade de concentração e eficiência, o coletor disco parabólico se destaca por ser especialmente adequado para aplicações de pequena escala que bloqueiam altas temperaturas, como em sistemas de geração distribuída. Uma das grandes vantagens desse sistema é a sua modularidade e flexibilidade, permitindo a sua instalação em áreas relativamente pequenas, o que o torna uma opção vantajosa quando comparada com outras tecnologias de concentração solar, como os coletores cilindro-parabólicos ou as torres solares. Isso facilita sua integração em locais com restrições de espaço, ampliando as possibilidades de aplicação, especialmente em regiões com alta radiação solar, como o Nordeste brasileiro (Kalogirou, 2016). Desta forma, o coletor de disco parabólico não apenas representa uma solução eficiente para a geração de eletricidade, mas também se configura como uma alternativa estratégica para atender à crescente demanda por fontes de energia renovável e sustentável.

Figura 5 – Concentrador disco parabólico.



Fonte: Py *et al.* (2017).

### 2.3.4 Fresnel Linear

O coletor Fresnel linear é uma tecnologia de concentração solar que utiliza uma série de espelhos planos ou levemente curvados, oferecido em paralelo, para refletir a radiação solar em um receptor fixo localizado acima dos espelhos. Ao contrário dos coletores parabólicos, como ilustrado na Figura 6, o sistema Fresnel linear tem como objetivo principal reduzir os custos de fabricação e instalação, adotando componentes mais simples e leves. Embora sua eficiência seja inferior aos coletores cilíndrico-parabólicos, devido à sua menor capacidade de captura de radiação solar direta, o coletor Fresnel linear oferece vantagens econômicas significativas, especialmente no que diz respeito à redução do custo inicial e à facilidade de manutenção. Sua construção simplificada e o uso de materiais mais fáceis tornam esse sistema uma solução atrativa para projetos que priorizam a previsão financeira.

O sistema pode atingir temperaturas de até 400°C, o que o torna uma alternativa viável para aplicações industriais que requerem aquecimento, como processos de secagem e destilação, bem como para a geração de eletricidade em sistemas de energia solar equipamentos. Essa capacidade de operar em temperaturas moderadas, sem comprometer de forma significativa o desempenho, faz do coletor Fresnel linear uma solução eficaz e econômica, especialmente em projetos onde a redução de custos é uma prioridade (Souza; Fraidenraich, 2020). Desta forma, o sistema é ideal para aplicações em larga escala, proporcionando uma opção acessível e sustentável para a geração de energia solar.

Figura 6 – Fresnel linear compacto.



## 2.4 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO TÉRMICO

Algumas plantas de energia solar concentrada (CSP), dependendo da tecnologia utilizada, podem ser integradas a sistemas de armazenamento térmico para armazenar não apenas o calor concentrado durante o dia, mas também gerar eletricidade em dias nublados ou após o pôr do sol. Essa capacidade de armazenamento permite que a planta continue a operar mesmo quando a radiação solar não está disponível, aumentando a confiabilidade e a flexibilidade do fornecimento de energia. Além disso, essas usinas podem ser hibridizadas com combustíveis fósseis, o que possibilita a geração de eletricidade durante as 24 horas do dia, melhorando o fator de eficiência térmica e a capacidade da planta. Essa abordagem não só otimiza a utilização da energia gerada, mas também contribui para a redução dos custos operacionais, tornando a tecnologia mais competitiva e acessível (Baharoon *et al.*, 2015).

Em uma usina heliotérmica com um sistema integrado de armazenamento térmico de energia (TES), a unidade de armazenamento é posicionada entre o campo solar e o ciclo de potência. Durante o processo de carregamento, parte da energia coletada no campo solar é direcionada para o ciclo de potência, enquanto o restante é transferido para a unidade de armazenamento. Já no processo de descarregamento, o fluido de trabalho do ciclo de potência é aquecido utilizando a energia armazenada no sistema de armazenamento. O TES é composto por tanques, trocadores de calor, fluido de transferência de calor, meio de armazenamento de calor e um sistema de controle. Embora o sistema de armazenamento de calor implique em custos de capital mais elevados, ele proporciona um aumento no fator de capacidade da planta e oferece maior controle sobre sua operação, permitindo uma maior flexibilidade e despachabilidade da usina, ou seja, a capacidade de controlar a geração de eletricidade conforme a demanda (Soria; Schaffer; Szklo, 2014).

Em relação ao funcionamento, o armazenamento de energia térmica por calor sensível acumula energia por meio da elevação da temperatura de um material. Durante o processo de carregamento, a energia térmica é armazenada à medida que a temperatura do material aumenta. Quando é necessário liberar essa energia, a temperatura do material diminui, liberando a calor acumulada. Esse tipo de armazenamento é amplamente utilizado em sistemas de armazenamento térmico em usinas heliotérmicas, pois é uma forma simples e eficiente de armazenar e liberar energia de acordo com a demanda. No entanto, a eficiência desse sistema depende da capacidade do material de retenção de calor e das condições operacionais do sistema (Liu *et al.*, 2016). A Tabela 1 apresenta os tipos de materiais utilizados para o armazenamento por calor sensível.

Tabela 1 – Tipos de materiais utilizados em armazenamento com calor sensível.

<b>T (fria) °C</b>	<b>T (quente) °C</b>	<b>Material</b>	<b>Tipo do Meio</b>
200	300	Areia - rocha - óleo	Sólido
200	400	Concreto Reforçado	Sólido
200	400	Ferro Fundido	Sólido
200	50	NaCl	Sólido
200	700	Aço fundido	Sólido
200	700	Tijolos de sílica	Sólido
200	1200	Tijolos de Magnésia	Sólido
250	450	Óleo sintético	Líquido
250	530	Sal de nitrato	Líquido
270	530	Sódio líquido	Líquido
280	550	Óleo de silicone	Líquido
180	150	Sal de lítio líquido	Líquido
300	345	Downtherm A	Líquido
0	345	Therminol 66	Líquido

Fonte: KURAVI *et al.* (2013).

## 2.5 CONVERSÃO ENERGÉTICA

As tecnologias de concentração solar discutidas podem ser aplicadas de duas formas principais: geração de energia elétrica e aquecimento de processos industriais . Ambas as abordagens utilizam energia solar de forma eficiente, mas sua aplicação depende das características específicas do sistema e das necessidades do processo.

A conversão solar térmica concentrada aplica uma rota de conversão termodinâmica que possibilita a utilização de ciclos termodinâmicos de combustão externa para transformar a energia solar em energia útil. Esses ciclos podem ser do tipo Rankine, Brayton ou Stirling, e cada um deles utiliza uma tecnologia específica para a conversão de calor em trabalho mecânico. O ciclo Rankine utiliza uma turbina a vapor, o ciclo Brayton emprega uma turbina a gás, e o ciclo Stirling baseia-se no funcionamento de um motor Stirling.

Esses ciclos termodinâmicos são fundamentais na adaptação da energia solar para a geração elétrica, permitindo substituir a energia proveniente dos combustíveis fósseis por uma fonte renovável e limpa (Kamal, 1988). A escolha entre os ciclos depende do tipo de tecnologia de concentração solar utilizada, das condições operacionais exigidas e das limitações de cada máquina. O ciclo Rankine é o mais comum e amplamente utilizado, especialmente quando combinado com os coletores cilíndrico-parabólicos, que são a tecnologia de concentração solar mais empregada até o momento. Já o ciclo Brayton, que exige temperaturas de operação muito altas, é mais adequado para grandes instalações com torres solares. O motor Stirling, por sua vez, é ideal para sistemas de menor escala, como os que utilizam discos parabólicos, devido à sua capacidade de

operação em temperaturas moderadas e ao tamanho compacto.

O sistema empregado na conversão de energia solar térmica se destaca por sua capacidade de lidar com fontes de energia intermitentes. Ele pode ser integrado a um sistema de armazenamento térmico , permitindo sua utilização tanto em períodos curtos quanto longos, dependendo da escala do sistema. Isso possibilita a geração de eletricidade e evita as interrupções de fornecimento que são comuns em outras tecnologias solares. Assim, em dias nublados ou quando há variações sazonais na DNI (irradiação normal direta), o calor armazenado potencializa a eficiência da planta, utilizando a tecnologia CSP para manter a capacidade de geração (Philibert *et al.*, 2014).

Nas usinas com tecnologia CSP , o conceito de armazenamento térmico é relativamente simples. Durante o dia, o excesso de calor gerado é transferido para um sistema de materiais térmicos. Quando a geração de energia é necessária, especialmente após a pôr do sol, a energia armazenada é liberada, permitindo a continuidade do funcionamento do ciclo termodinâmico . Esse processo permite que a usina prolongue o período de geração de energia conforme necessário. Em termos práticos, parte da energia solar gerada é armazenada e, quando a produção excede a demanda da usina ou de indústrias, o excesso pode ser direcionado para um reservatório térmico separado . Além disso, uma vantagem significativa dessa abordagem é a possibilidade de integrar a tecnologia CSP com outras fontes de energia, como biomassa , gás natural e energia fotovoltaica , aumentando a flexibilidade e a eficiência do sistema como um todo.

A energia pode ser armazenada em diversos tipos de sistemas de armazenamento térmico , como sensível , latente ou termoquímico . Nos últimos anos, a maioria das usinas comerciais de sistemas CSP adotaram sistemas de armazenamento sensíveis, que geralmente consistem em dois tanques de armazenamento utilizando sais fundidos como meio para armazenar a energia térmica (Liu *et al.*, 2016).

### 2.5.1 Ciclo Rankine Orgânico

O ciclo Rankine geralmente utiliza água como fluido de trabalho, sendo conhecido como ciclo Rankine a vapor (CRV). No entanto, existe uma variação desse ciclo, que substitui a água por um fluido orgânico. Esse ciclo é denominado ciclo Rankine orgânico (Organic Rankine Cycle - ORC), que se distingue pelo fluido de trabalho utilizado. Em vez de água, o ORC opera com fluidos orgânicos, como hidrocarbonetos leves e refrigerantes, a exemplo do R134-a, R-123, isobutano, metanol e propano, que possuem pontos de ebulição mais baixos, permitindo o uso de fontes de calor a temperaturas reduzidas. Isso amplia suas aplicações, tornando-o ideal para recuperar energia de fontes de calor residual ou de baixa temperatura, como processos industriais, energia geotérmica e solar. Embora o ORC também possa funcionar com combustíveis fósseis, os estudos atuais

focam na sua integração com fontes renováveis, como biomassa e calor residual, promovendo maior eficiência energética e sustentabilidade ambiental. A versatilidade do ORC faz dele uma tecnologia promissora para reduzir o impacto ambiental da geração de energia (Moraes, 2017).

Plantas solares que utilizam o ciclo Rankine orgânico (ORC) apresentam diversas vantagens sobre as soluções tradicionais. Elas são mais compactas, custam menos e são particularmente vantajosas na exploração de recursos de baixa temperatura, onde o ciclo Rankine a vapor (CRV) não seria tão eficiente (Mcmahan, 2006). A operação com água no CRV, em baixas temperaturas não é viável devido ao baixo título de vapor, o que pode causar problemas significativos à turbina a vapor.

Por outro lado, os ORCs são capazes de operar em uma faixa de temperaturas entre 80 e 400°C afirma GEORGES et al. (2013), ou que se alinham com a temperatura alcançada pela maioria das tecnologias de coletores solares mais utilizadas. Essa característica torna o ORC uma solução extremamente flexível, capaz de aproveitar fontes de calor mais variadas e em faixas de temperatura menores, ampliando significativamente seu campo de aplicação. Além disso, sua capacidade de operar com fontes de calor de menor temperatura torna-o ideal para sistemas solares concentrados em locais onde as condições térmicas não excluem temperaturas muito elevadas.

No geral, os ORCs são mais utilizados em aplicações de pequena e média escala, abaixo de 5 MW. Outro ponto a favor do ciclo Rankine orgânico é que esse reduz o consumo de água em aproximadamente 98% comparado a plantas convencionais (Price et al., 2002). Sistemas ORC são notoriamente bastante atrativos para uso em geração distribuída offgrid.

O ciclo Rankine ideal é um processo termodinâmico amplamente empregado em sistemas de geração de energia, composto por quatro etapas fundamentais como insdica a Figura 7 . Na primeira, ocorre a compressão isentrópica na bomba, onde o fluido, geralmente água, tem sua pressão aumentada sem alterar a entropia. Em seguida, na caldeira ou evaporador, o fluido recebe calor a pressão constante, transformando-se em vapor superaquecido. Posteriormente, esse vapor se expande isentropicamente na turbina, gerando trabalho útil convertível em energia elétrica. O ciclo se completa com a rejeição de calor a pressão constante no condensador, onde o vapor é resfriado e retorna ao estado líquido, pronto para reiniciar o processo. Descoberto por William John Macquorn Rankine, o ciclo Rankine é amplamente utilizado em usinas termoelétricas, podendo empregar diversas fontes de calor, como a combustão de hidrocarbonetos, biomassa e aquecimento solar. Essa flexibilidade e eficiência fazem do ciclo uma solução robusta para a produção de eletricidade em larga escala (Cengel, 2011).

As principais equações envolvidas no Ciclo Rankine são as seguintes:

**Processo 1-2- Aquecimento:** No processo de aquecimento, a água líquida

é convertida em vapor saturado ou superaquecido. A energia fornecida ao fluido de trabalho é dada pela Equação 1.

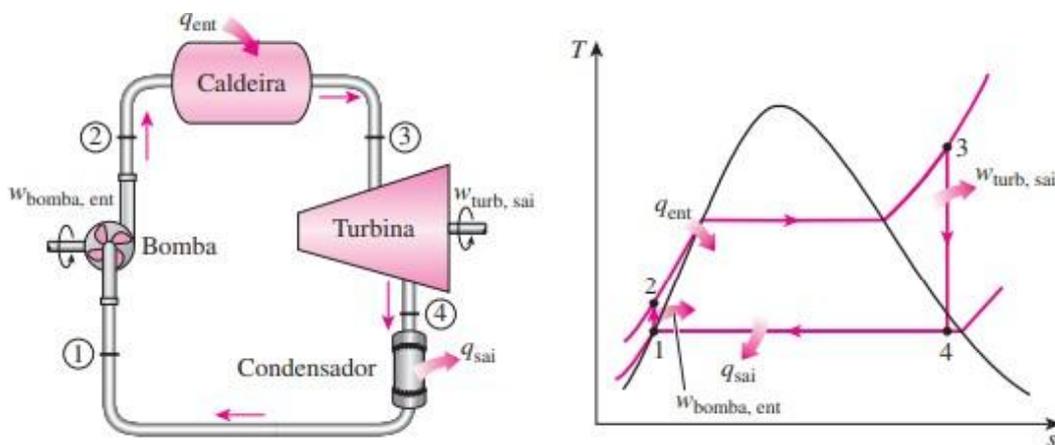
$$Q_{in} = h_2 - h_1 \quad (1)$$

onde  $h_1$  é a entalpia do líquido antes do aquecimento e  $h_2$  é a entalpia do vapor após o aquecimento.

**Processo 2-3-Expansão:** Durante a expansão no turbina, o vapor superaquecido ou saturado se expande, realizando trabalho. O trabalho realizado pela turbina é dada pela Equação 2.

$$W_{turbina} = h_2 - h_3 \quad (2)$$

Figura 7 - Ciclo Rankine simples ideal.



Fonte: Cengel (2011).

**Processo 3-4-Resfriamento:** No condensador, o vapor é resfriado e condensado de volta a líquido. A energia rejeitada durante o resfriamento é dada pela Equação 3.

$$Q_{out} = h_3 - h_4 \quad (3)$$

**Processo 4-1-Compressão:** No processo de compressão, o líquido é comprimido pela bomba para retornar ao estado inicial do ciclo. O trabalho realizado pela bomba é dado por:

$$W_{bomba} = h_4 - h_1 \quad (4)$$

**Eficiência do Ciclo Rankine:** A eficiência térmica do Ciclo Rankine é dada pela relação entre o trabalho líquido produzido e o calor fornecido equacionada pela Equação 5.

$$\eta = \frac{W_{turbina} - W_{bomba}}{Q_{in}} \quad (5)$$

Outro aspecto crucial para o Ciclo Rankine Orgânico (ORC) é a seleção do fluido de trabalho, uma vez que o desempenho do ciclo está diretamente relacionado ao fluido escolhido para a instalação. O fluido orgânico selecionado exerce um papel determinante no tipo de aproveitamento alcançado, influenciando tanto a eficiência do ciclo quanto a forma de utilização da energia. Além das propriedades técnicas e termodinâmicas, como maximizar o rendimento térmico e a potência elétrica gerada, e minimizar o trabalho requerido pela bomba, a escolha do fluido deve considerar questões ambientais, segurança, saúde pública e fatores econômicos. Portanto, a escolha do fluido de trabalho no CRO é um processo rigoroso e fundamentado, que vai além de aspectos puramente técnicos. A análise criteriosa deve incluir a avaliação dos impactos ambientais e dos riscos de segurança, além de levar em conta os custos e benefícios econômicos da operação. Dessa forma, o fluido ideal não apenas maximiza a eficiência do ciclo, mas também garante um funcionamento sustentável e seguro para a sociedade (Mascarenhas, 2014).

## 2.6 BENEFICIAMENTO DO JEANS

Polo de Confeções do Agreste Pernambucano responde por 17% da produção nacional de peças confeccionadas em jeans e produz aproximadamente 60 milhões de peças de vestuário por mês, o que corresponde a 15% da produção da indústria brasileira de vestuário. Composto por cerca de 20 mil empresas, o polo processa cerca de 210 mil toneladas de tecido por ano, consolidando-se como o segundo maior polo de confeções do Brasil (SEBRAE, 2012). A região abriga mais de 18 mil empresas de confecção e lavanderias industriais especializadas no beneficiamento de jeans, localizadas principalmente nas cidades de Caruaru, Toritama, Riacho das Almas, Santa Cruz do Capibaribe e Surubim.

A água desempenha um papel essencial na indústria têxtil, especialmente no beneficiamento de vestuário em jeans. Ela é amplamente utilizada como o principal agente de remoção de impurezas do tecido, além de ser fundamental na aplicação de corantes e outros produtos químicos usados no acabamento dos tecidos. A água aquecida a temperaturas que variam entre 60°C e 90°C facilita processos como o tingimento, a neutralização de resíduos e a remoção de substância indesejável no processo de lavagem de jeans (Schoeberl *et al.*, 2005).

No beneficiamento do jeans temos os seguintes processos: desengomagem, estonagem, redução de cor, neutralização, limpeza, alvejamento e amaciamento. A desengomagem consiste na remoção das gomas aplicadas aos fios do tecido denim em seu processo de elaboração, com o auxílio da enzima amilase. A estonagem corresponde à etapa que caracteriza o “processo de lavagem”, uma vez que confere às peças o aspecto de desgaste e envelhecimento. Nesta etapa é utilizada a enzima celulase com o objetivo de promover o ataque às fibras do algodão, desgastando-as.

O alvejamento melhora o aspecto visual destacando os fios brancos e azuis do tecido. Já, o amaciamento tem como característica conferir às peças maciez e melhor sensação ao toque, tornando-as mais agradáveis (Pedrosa; Duarte,2009). Na Tabela 2 estão representados os processos do beneficiamento do jeans especificando a temperatura da água utilizada e o tempo do processo.

Tabela 2 – Temperatura e tempo por procedimentos de lavagem no beneficiamento do jeans.

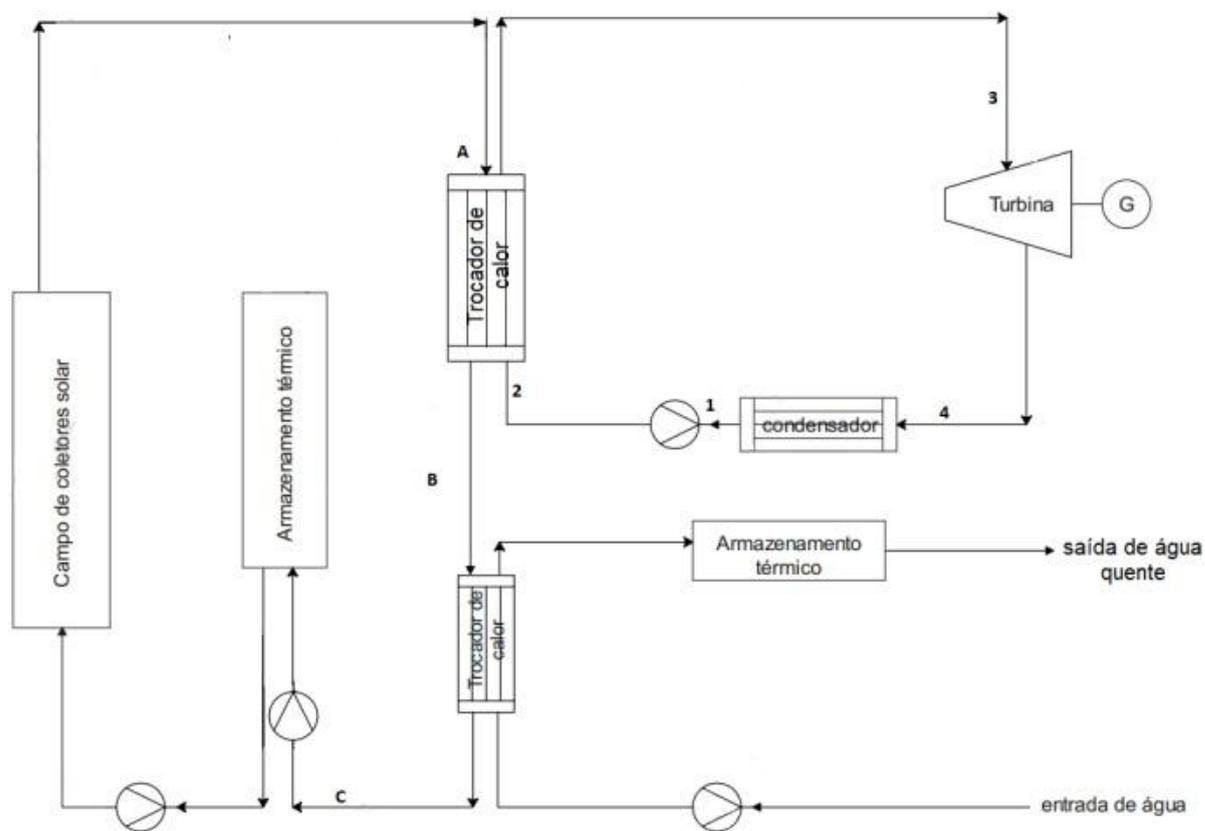
PROCESSO	TEMPERATURA(°C)	TEMPO (MINUTOS)
DESENGOMAGEM	50	5-10
ESTONAGEM	40	30-60
REDUÇÃO DE COR	25	5-20
NEUTRALIZAÇÃO	25	5-20
LIMPEZA	60	10-20
ALVEJAMENTO	60	10-30
AMACIAMENTO	25	5-10

Fonte: SILVA *et al.*, 2024.

### 3 METODOLOGIA

Esse trabalho é uma pesquisa aplicada, com finalidade de simular a produção de energia heliotérmica de uma planta teórica situada na cidade de Surubim-PE, esquematizada na Figura 8. Quanto aos objetivos, trata-se de uma pesquisa descritiva, visto que descreve e analisa os processos envolvidos na eficiência energética de uma planta heliotérmica. A abordagem é mista, incluindo dados quantitativos, como simulações e medições de eficiência, e qualitativos, como a análise das condições climáticas da região do agreste pernambucano.

Figura 8 – Esquema do sistema de produção combinada.



Fonte: Próprio autor (2025).

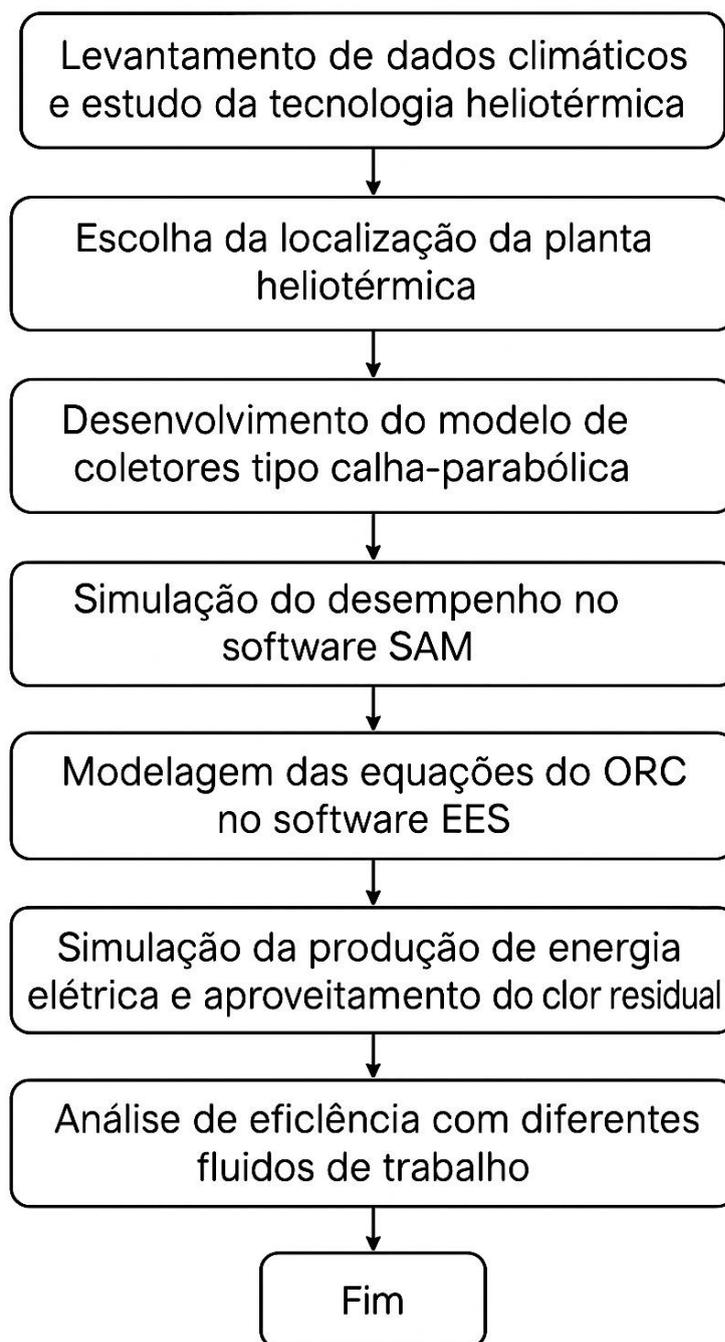
O sistema descrito é composto por um campo de coletores concentradores lineares, que estão conectados a um circuito termo-hidráulico primário, responsável por fornecer calor diretamente a um sistema de armazenamento de energia térmica. O campo de coletores lineares é projetado para aquecer o fluido a uma temperatura máxima de 300°C, com o retorno ao coletor variando entre 200°C e 210°C. O armazenamento de energia térmica é abordado de maneira genérica, sem especificar um tipo particular de sistema; assim, embora seja representado por um único bloco, pode consistir em um ou dois tanques. Sua principal função no sistema é garantir a estabilidade e continuidade no fornecimento de calor, independentemente das flutuações na disponibilidade do recurso solar. A energia armazenada é então utilizada de forma constante tanto para o ciclo Rankine quanto para aplicações de calor de processo.

### 3.1 ETAPAS DA PESQUISA

O principal objetivo deste estudo é simular a geração de energia em uma planta heliotérmica teórica. Após uma revisão bibliográfica sobre a tecnologia heliotérmica e a análise de dados climáticos da cidade de Surubim-PE, foi desenvolvido um modelo utilizando coletores solares do tipo calha parabólica. Com o auxílio do software *System Advisor Model* (SAM), foi simulada a eficiência dos coletores, sendo a temperatura de saída do fluido térmico (Therminol-VP) utilizada como base para a modelagem do ciclo Rankine Orgânico (ORC), no software *Engineering Equation Solver* (EES). A partir dessa modelagem, foi estimada a quantidade de energia elétrica gerada. Além disso, o calor residual produzido foi aproveitado para o aquecimento de água, utilizada no processo de beneficiamento de jeans.

Além da simulação da planta heliotérmica, o trabalho destaca a importância da escolha do fluido de trabalho no ciclo Rankine Orgânico (ORC) para otimizar o desempenho do sistema. Foram avaliados diferentes fluidos orgânicos, como benzeno, n-pentano, isobutano e tolueno, com o fito de identificar qual deles proporcionaria maior eficiência na conversão de energia térmica em eletricidade. Essa escolha criteriosa do fluido de trabalho mostrou-se fundamental para maximizar a eficiência energética da planta, especialmente nas condições climáticas específicas de Surubim-PE. O fluxograma do processo utilizado na metodologia do trabalho é exibido na Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma dos procedimentos utilizados nesse trabalho.



Fonte: Próprio autor.

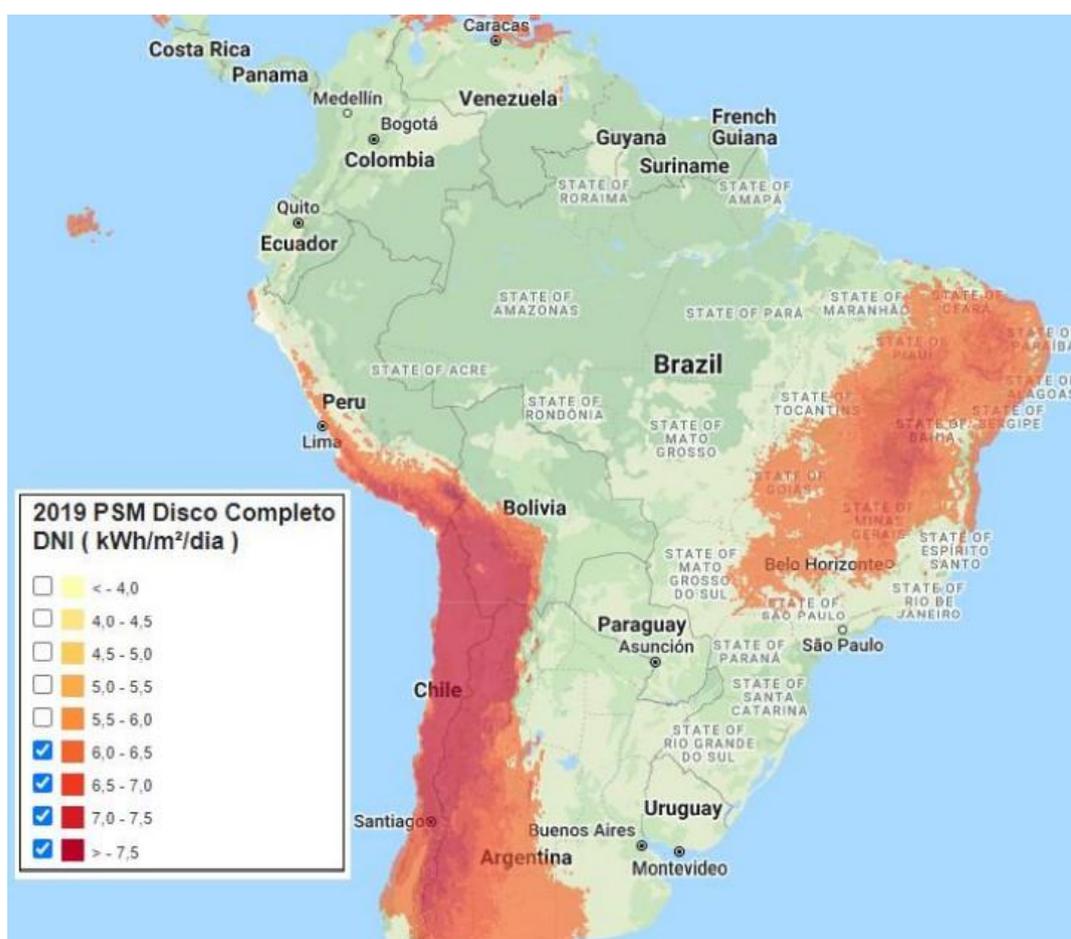
### 3.2 ESCOLHA DA LOCALIDADE

Ao analisar o recurso solar para a construção de uma usina solar com tecnologia CSP, é fundamental considerar a irradiação normal direta (DNI) para avaliar a avaliação do projeto. A intensidade mínima de DNI recomendada para projetos de CSP tem sido amplamente discutida na literatura. Alguns autores sugerem que o valor mínimo deve ser  $1.700 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$ , ou que equivale a aproximadamente  $4,6 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$  (Ummel, 2010). Outros defendem um valor

mínimo de 2.400 kWh/m<sup>2</sup>/ano , cerca de 6,6 kWh/m<sup>2</sup>/dia (Fluri, 2009). No entanto, o valor amplamente adotado como mínimo tem sido 2.000 kWh/m<sup>2</sup>/ano , o equivalente a 5,5 kWh/m<sup>2</sup>/dia (Evens; San, 2005).

No mapa do Brasil, as áreas com maior DNI apresentam um alto potencial para a implementação da tecnologia CSP . Essas regiões estão predominantemente localizadas no interior da região Nordeste , abrangendo estados como Bahia , Pernambuco e Ceará . Além disso, algumas zonas da região Sudeste , como Minas Gerais e São Paulo , também possuem alto potencial para o uso dessa tecnologia. No Centro-Oeste , o potencial é mais restrito, com destaque para áreas ao redor de Brasília e algumas regiões do Mato Grosso do Sul . Na Figura 10, estão as áreas com maior DNI (<6,0 kWh/m<sup>2</sup>/dia) apresentam um alto potencial para a implementação da tecnologia CSP .

Figura 10 – - Mapa de Irradiação solar direta normal (DNI)–faixa acima de 6,0 kWh/m<sup>2</sup>/dia.



Fonte: NREL Geospatial Data Science (2019).

Dado que uma planta CSP só apresenta potencial econômico em regiões com DNI superior a 5,5 kWh/m<sup>2</sup>/dia , optou-se por utilizar a cidade de Surubim – PE como local para as simulações deste estudo, pois além de ter um bom potencial de produção energética está situado numa região do polo de confecções onde será

aproveitado o calor residual do processo de geração de energia para aquecimento da água utilizada no beneficiamento do jeans. Além disso, levando em conta que o SAM exige dados específicos para sua análise e, considerando que os índices de DNI nesta região são ainda mais elevados, atingindo valores de 6,5 kWh/m<sup>2</sup>/dia, conforme apresentado anteriormente.

### 3.3 SAM

Para este estudo, optou-se pelo uso do software SAM como principal ferramenta de análise, devido às suas grandes vantagens fornecidas pelo modelo físico proprietário, que permite simular plantas CSP em diversas configurações. Este software se destaca pela precisão e é amplamente utilizado em estudos e pesquisas semelhantes a este, sendo uma escolha consolidada no campo de análise de sistemas de energia solar.

Diversos estudos já utilizaram o modelo SAM para realizar análises na área de CSP

. Por exemplo, Kesseli *et al.* (2019) discutem diretrizes para a modelagem de plantas CSP e a conformidade do SAM com sistemas de energia solar equipamentos. Kurup e Turchi, (2015) atualizaram os custos dos coletores parabólicos para o SAM. Ezeanya *et al.* (2018) realizaram simulações no SAM para comparar o desempenho de uma planta CSP com dados reais de operação. Guzman, Henao e Vasquez (2014) utilizaram o SAM para simular e melhorar o desempenho de uma planta de cilindros parabólicos na cidade de Barranquilla. Esses estudos demonstram a aplicabilidade e a eficácia do SAM em diversas simulações e avaliações do desempenho de plantas solares equipamentos.

O software realiza uma previsão de desempenho para sistemas de geração de energia elétrica, tanto os conectados quanto os não conectados à rede elétrica. Ele é capaz de modelar diversos tipos de sistemas de energia renovável, incluindo: sistemas fotovoltaicos, sistemas de concentração de energia solar, calor de processo industrial, energia eólica, energia geotérmica, energia das ondas e marés, aquecimento solar de água, células de combustível, combustão de biomassa para geração de energia, entre outros. O modelo calcula o custo da geração de eletricidade com base em informações fornecidas pelo usuário, como: localização, dados meteorológicos, custos de instalação, custos de operação e manutenção (O&M), financiamento, incentivos aplicáveis, tecnologia e outras especificações do sistema (Blair; Ferguson; Janzou, 2014).

O usuário possui total controle sobre as variáveis de entrada, embora cada modelo preencha com dados padrão, os quais são baseados no modelo original (no caso de plantas CSP). Assim, é responsabilidade do usuário alterar e ajustar essas variáveis de acordo com as restrições e especificações do projeto. O SAM dispõe de uma biblioteca com dados climáticos e informações de desempenho, permitindo que o usuário escolha uma variável já existente, que contenha todos

---

os parâmetros definidos, ou que faça essas modificações conforme necessário. Além disso, o usuário pode criar novas variáveis com restrições específicas ou ainda fazer o download de modelos de sites confiáveis, desde que os arquivos estejam em um formato compatível para upload no programa.

### 3.4 FLUIDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Em sistemas térmicos, os fluidos com propriedades físico-químicas significativas para o transporte de calor são denominados fluidos de transferência de calor, ou HTF (Heat Transfer Fluid). Em uma usina CSP (Concentrated Solar Power), o HTF desempenha um papel crucial ao atuar como intermediário entre o campo solar e os blocos subsequentes. Ele absorve o calor gerado pela radiação concentrada no receptor e, em seguida, transfere essa energia térmica para os blocos de potência, garantindo a continuidade do processo de geração de energia (Cuieca, 2019).

Óleos térmicos são frequentemente empregados como fluido de transferência de calor (HTF) em usinas CSP, representando mais de 90% das aplicações, devido à sua estabilidade térmica, baixa pressão de vapor e temperatura de cristalização apreciável. O Therminol VP-1 é o mais utilizado, operando de 12°C até 398 °C, enquanto o Dowtherm e o Sytherm 800 são alternativas que podem operar até 398 °C e 420 °C, respectivamente, mas com alta pressão de vapor. Contudo, esses óleos apresentam propriedades que limitam a produtividade das usinas. A temperatura de operação restrita a 398 °C condiciona a temperatura do vapor, o que torna o ciclo térmico menos eficiente. Além disso, os óleos térmicos são poluentes e apresentam alto risco de incêndio devido à sua baixa temperatura de ignição em condições atmosféricas (Moya, 2017). Dessa forma o HTF escolhido para a simulação foi o Therminol VP-1 onde os seus dados já estão inclusos na biblioteca do SAM.

### 3.5 COLETORES PARABOLICOS

O coletor modelo LS-2, fabricado pela LUZ Industries, foi escolhido para a simulação, pois este modelo é utilizado em seis das novas plantas SEGS (SEGS II – SEGS VII) e teve seu desempenho avaliado experimentalmente por Dudley et al. (1994). O receptor é composto por um tubo de vidro externo, um tubo absorvedor interno com revestimento seletivo Cermet na superfície, e um dispositivo sólido de restrição de fluxo, inserido no centro do receptor. Os parâmetros desse coletor estavam na biblioteca do SAM estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 – Características geométricas e óticas do coletor LS-2

<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Comprimento	47,1	Metros
Abertura	5	Metros
Ângulo de borda	70	Graus
Diâmetro do absorvedor	70	Milímetros
Relação de Concentração	23	-
Eficiência óptica	0,733	-

Fonte: Dados da biblioteca do SAM.

### 3.6 RECEPTORES

Os receptores base escolhidos para este estudo foram os modelos Solel UVAC 3, devido à sua ampla difusão e utilização em importantes usinas CSP, como a Andasol-1 (Ferrer; Mehos, 2013), localizada em Aldeire, na Espanha. Além disso, esses receptores já estavam disponíveis na biblioteca do SAM, facilitando sua aplicação na análise. Os dados do receptor Solel UVAC 3 estão na Tabela 4.

Tabela 4 – Características do Receptor Solel UVAC 3

<b>Características</b>	<b>Valores</b>
Diâmetro interno do absorvedor	0,066 m
Diâmetro externo do absorvedor	0,070 m
Diâmetro interno do envelope de vidro	0,115 m
Diâmetro externo do envelope de vidro	0,121 m
Absortância do tubo absorvedor	96%
Emitância do tubo absorvedor	< 8% para T < 300°C
Material do absorvedor	Aço 304L

Fonte: Dados da biblioteca do SAM.

### 3.7 OUTROS PARÂMETROS DE ENTRADA

#### 3.7.1 Projeto do Sistema (Parâmetros das condições nominais de projeto)

- Design point DNI: DNI disponível nas condições nominais de projeto.
- Target solar multiple: Este parâmetro é utilizado quando se deseja superdimensionar a saída térmica do campo solar em relação à demanda térmica a ser consumida, ou seja, quando se pretende integrar armazenamento térmico para manter o fornecimento de energia durante o dia e além das horas de sol. Neste trabalho, optou-se por não utilizar o armazenamento para ampliar o número de horas de produção de energia o armazenamento foi empregado apenas para garantir a continuidade e a flexibilidade do fornecimento, dimensionando o campo exatamente para a saída desejada.
- Loop inlet temperature: Temperatura nominal de retorno do fluido térmico aos loops do campo solar.
- Loop outlet temperature: Temperatura nominal de saída do fluido térmico dos loops do campo solar. Esta é a temperatura que o SAM tenta manter quando possível, sendo também a temperatura fornecida à entrada do trocador de calor do ciclo de potência.

- Heat sink power: Entrada térmica nominal das unidades consumidoras, que para este estudo correspondem ao ciclo de potência e ao trocador de calor para processos industriais.

### 3.7.2 Campo Solar (Parâmetros do Campo e do Fluido Térmico)

A seguir, são apresentados os principais parâmetros referentes ao campo solar e ao fluido de transferência de calor, conforme definidos no SAM. Os valores detalhados estão dispostos na Tabela 5.

- Espaçamento entre fileiras: Este parâmetro define a distância entre as linhas de coletores de modo a minimizar o sombreamento durante períodos de baixa elevação solar.
- Temperatura de proteção contra congelamento Estabelece o limite inferior de operação para o HTF, evitando seu congelamento. Considerando que o Therminol VP-1 opera no intervalo de 15°C a 400°C, definiu-se 20°C como a temperatura mínima. Abaixo desse valor, um sistema de aquecimento elétrico é acionado.
- Taxa de fluxo mínimo e máximo em loop: Determinam os limites da vazão de massa permitida em cada loop do campo solar, garantindo que a energia absorvida e as temperaturas desejadas sejam alcançadas.
- Velocidade de fluxo mínima e máxima no cabeçalho : Esses parâmetros especificam o intervalo de velocidades do HTF na tubulação de distribuição, sendo essenciais para dimensionar o diâmetro adequado das tubulações à medida que o fluido se distribui pelos loops.
- Consumo de água por lavagem e número de lavagens anuais : Indicadores que definem o volume de água utilizado em cada procedimento de limpeza dos coletores e a frequência anual dessas operações. Os valores adotados correspondem aos padrões preestabelecidos pelo SAM.

O SAM foi utilizado para simular o sistema solar térmico, que consiste em um campo de coletores solares conectado a um sistema de armazenamento de energia térmica. O SAM revelou, ao longo de um ano, os valores da temperatura do fluido de transferência de calor ( $T_{HTF}$ ) para cada hora do ano, considerando as variações diárias e sazonais da radiação solar e as condições climáticas locais. Estes valores de  $T_{HTF}$  foram fundamentais para o desenvolvimento da simulação subsequente no EES, que permitiu analisar a produção de energia elétrica e o calor do processo gerado.

Tabela 5 – Dados de entrada para simulação em Surubim-PE

Design point DNI / DNI de projeto	800 W/m <sup>2</sup>
Target solar multiple / Múltiplo solar alvo	1
Loop inlet temp. / Temperatura de entrada do loop	200°C
Loop outlet temp. / Temperatura de saída do loop	300°C
Heat sink power / Potência da unidade consumidora	32,7 MWt
Row spacing / Espaçamento entre fileiras	5 m
Freeze protection temp / Temperatura de proteção contra congelamento	20°C
Min single loop flow rate / Vazão mínima em um loop	0,35 kg/s
Max single loop flow rate / Vazão máxima em um loop	5 kg/s
Header design min flow velocity / Velocidade mínima no tubo de distribuição	0,09 m/s
Header design max flow velocity / Velocidade máxima no tubo de distribuição	3 m/s
Water usage per wash / Consumo de água por lavagem	0,7 L/m <sup>2</sup>
Washes per year / Lavagens por ano	12
Number of SCAs per loop / Número de coletores por loop	8

Fonte: Proprio autor (2025).

### 3.8 MODELAGEM DO ORC

O Engineering Equation Solver (EES - Versão utilizada: 10.561) é uma ferramenta desenvolvida pela F-Chart Software (F-CHART, 2015) que se destina à resolução de sistemas de equações simultâneas não lineares. Destaca-se por seu banco de dados abrangente, que inclui propriedades termodinâmicas e de transporte de alta precisão para centenas de substâncias. Esta característica torna o EES particularmente valioso na modelagem de ciclos de potência. No contexto deste estudo, o EES foi utilizado em conjunto com o SAM para modelar o ciclo de potência empregado na geração elétrica. A necessidade de utilizar o EES surgiu devido à limitação do SAM em fornecer apenas a temperatura de saída do fluido térmico dos coletores solares do campo. Para a simulação do ciclo Rankine orgânico foi utilizado o software EES e inicialmente como fluido orgânico o benzeno, e os demais dados de entrada estão na Tabela 6. Como também os processos são definidos apenas quando a temperatura da saída do HTF for maior que 275°C.

A eficiência isoentrópica das turbinas a vapor em condições de baixas temperaturas varia entre 60% e 65%, enquanto turbinas projetadas para o ciclo ORC podem alcançar eficácias superiores a 85% (Vanslambrouck *et al.*, 2012). No contexto do estudo em questão, foram considerados valores de eficiência de 75% para as turbinas, valor frequentemente observado sem a necessidade de um projeto de turbina específico. Além disso, a eficiência da bomba foi de 80% e do gerador foi estabelecida em 95%, enquanto os trocadores de calor foram atribuídos a uma eficiência total de 82%.

Com os dados de T<sub>HTF</sub> obtidos do SAM, foi possível implementar uma simulação no EES para calcular a produção de energia elétrica e o calor de processo. Para isso, foi criada uma tabela paramétrica no EES, onde a temperatura do fluido HTF variava ao longo do ano, observando os valores

fornecidos pela simulação do SAM. Através dessa tabela, foi possível simular a resposta do sistema a diferentes temperaturas do HTF e calcular as variáveis de interesse, como a potência elétrica gerada e a temperatura da água quente.

Tabela 6 – Eficiências isoentrópicas dos componentes dos ciclos de potência.

<b>Componente</b>	<b>Eficiência</b>
Turbina ORC	0,75
Bomba	0,80
Gerador	0,95
Trocadores de calor (combinada)	0,82

Fonte: Proprio autor (2025).

A produção de energia elétrica foi simulada considerando o ciclo Rankine Orgânico (ORC), que utiliza inicialmente o fluido de trabalho isobutano para converter a calor fornecida pelo sistema solar térmico em energia elétrica. A temperatura do HTF, fornecida pelo SAM, foi usada como entrada para a função "evaporacao" no EES, que calcula a temperatura de evaporação ( $T_{ev}$ ) do fluido de trabalho. Com o valor de  $T_{ev}$ , foi calculado a potência líquida gerada pelo ciclo ORC, levando em consideração a eficiência dos componentes do sistema, como turbina, bomba e gerador, além das propriedades do fluido de trabalho.

Além da geração de energia elétrica, também foi considerado o calor do processo fornecido pelo sistema, especificamente o aquecimento de água. A função *aguaquenteno* no EES foi utilizada para calcular a temperatura final da água quente após uma troca de calor com o HTF. Um vazão de calor foi calculado a partir da variação de temperatura do HTF, considerando a massa de água em circulação e as propriedades térmicas dos fluidos envolvidos.

Inicialmente, o fluido orgânico utilizado no ciclo Rankine Orgânico (ORC) foi o isobutano, escolhido devido às suas boas propriedades termoquímicas e adequação para operar em sistemas de temperatura moderada, como os que envolvem energia solar térmica. No entanto, para avaliar o desempenho do sistema sob diferentes condições, foram realizados testes utilizando outros fluidos orgânicos, incluindo benzeno, n-pentano e tolueno. A escolha desses fluidos visa comparar as diferenças em termos de eficiência e produção combinada de energia elétrica e calor de processo, considerando as propriedades térmicas e a temperatura de saturação de cada um. Os resultados obtidos para cada fluido foram analisados em relação à potência gerada e ao calor fornecido ao processo, permitindo identificar o fluido mais adequado para melhorar o desempenho do ciclo ORC em termos de eficiência energética e capacidade de fornecimento de calor. A comparação entre os fluidos possibilitou uma análise detalhada de como diferentes propriedades dos fluidos influenciam a produção de energia e o aproveitamento térmico do sistema.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

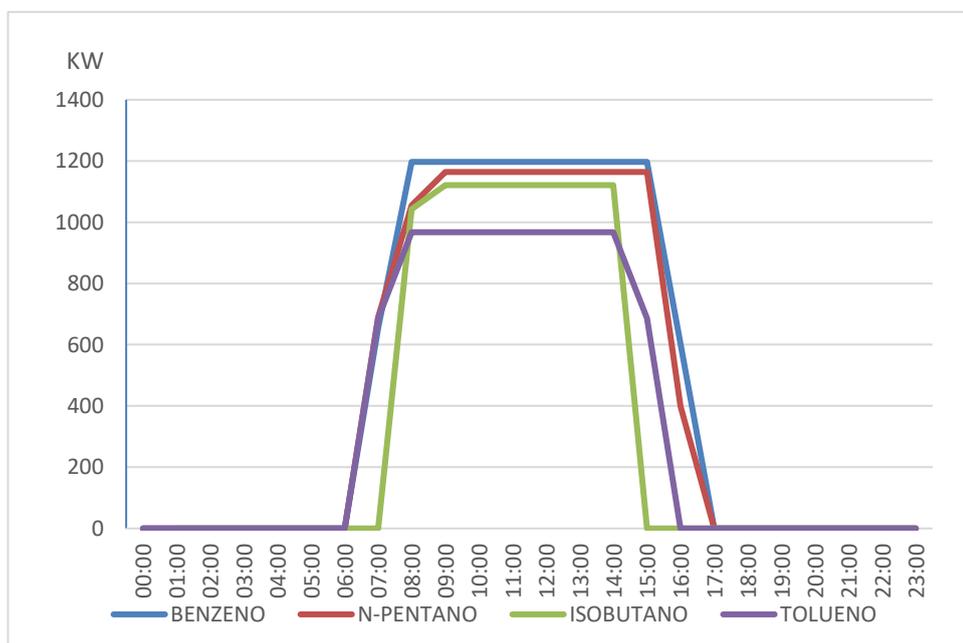
Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da simulação do campo solar realizada nos softwares SAM e ESS, cujo objetivo principal foi analisar a geração de energia elétrica e de calor de processo em um sistema solar térmico. A simulação apresentou um comportamento quase periódico, evidenciado pela variação diária das condições de radiação solar, o que refletiu diretamente nos resultados de geração de energia e no desempenho térmico do sistema, visto que não foi utilizado o sistema de armazenamento térmico.

Dada a periodicidade observada, foi selecionada uma amostra representativa de 24 horas de um mesmo dia para aprofundar a análise. Essa escolha visa compreender melhor as flutuações e os padrões de comportamento do sistema ao longo de um ciclo diário, considerando os aspectos mais críticos do processo, como a geração de energia elétrica e a produção de calor para o processo representado pela produção de água quente numa temperatura de 70°C.

### 4.1 PRODUÇÃO DE ENERGIA ELETRICA

Os resultados da simulação do ORC no ESS para cada fluido de trabalho estão representados na Figura 11. Observe-se uma grande semelhança nos horários de produtividade da planta: para o benzeno e o n-pentano, o período produtivo vai de 07:00 às 16:00; para o tolueno, a produtividade ocorre das 07:00 às 15:00; e para o isobutano, o horário produtivo se estende das 08:00 às 14:00. Durante o período planejado para a produção, o n-pentano apresentou uma média de 1.029 kW, enquanto o benzeno, isobutano e tolueno apresentaram médias de 1.083 kW, 1.109 kW e 904 kW, respectivamente.

Figura 11 – Produção de energia elétrica.

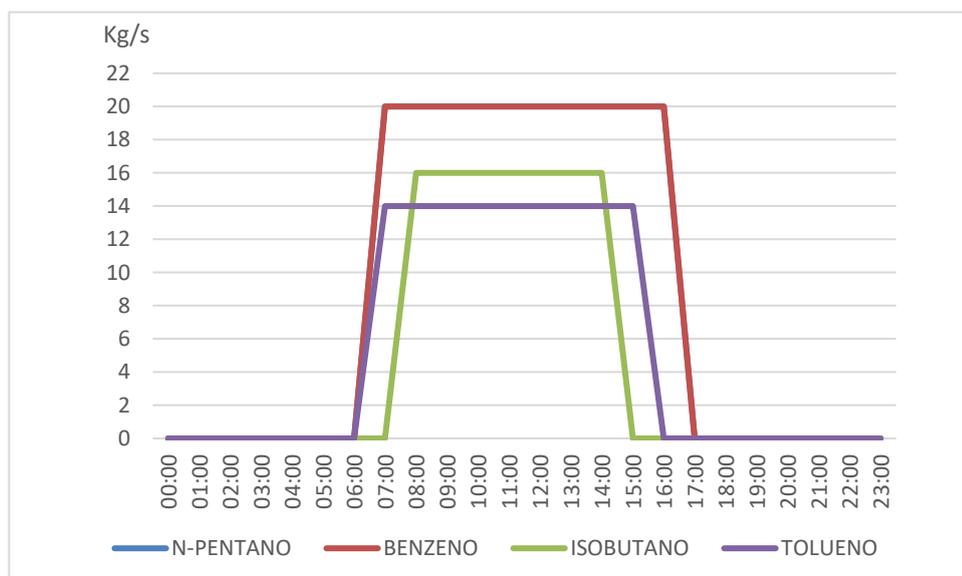


## 4.2 PRODUÇÃO DE ÁGUA QUENTE

O calor residual do processo de geração de energia, foi utilizado no aquecimento da água quente numa temperatura de 70°C que será utilizada no beneficiamento do jeans. De forma que a vazão de água foi ajustada para que a temperatura do HTF ao retornar ao campo solar estivesse numa temperatura próxima ao 200°C estipulado como entrada da simulação. Os resultados estão expressos na Figura 13.

Os dados indicam que a maior produção ocorre entre as 07:00 e as 16:00, com des-taque para os compostos N-Pentano e Benzeno, que apresentam uma produção constante de água quente de aproximadamente 20 kg/s durante esse período. O Isobutano também apresenta produção significativa, embora com valores diminuídos, variando de 16 kg/s entre 08:00 e 15:00. Já o Tolueno mostra uma produção mais irregular, com valores de 14 kg/s nas primeiras horas e quedas para 0 kg/s nas últimas. A ausência de produção de água quente no período da noite (17h00 às 23h00) reflete a diminuição da disponibilidade de calor residual, típica em sistemas que dependem da operação contínua para gerar calor. Esses resultados evidenciam a eficiência do aproveitamento do calor residual no aquecimento da água, contribuindo para um melhor aproveitamento energético do processo e a redução de custos operacionais no beneficiamento do jeans.

Figura 12 – Produção de água quente.



Fonte: Proprio autor (2025).

### 4.3 DISCUSSÃO

A análise comparativa entre os fluidos de trabalho também revela como a eficiência na produção de energia elétrica e de água quente pode impactar os custos operacionais no beneficiamento de jeans. O n-pentano e o benzeno, com sua capacidade de fornecer energia elétrica constante e produção de água quente eficiente, demonstram um ótimo desempenho em termos de aproveitamento energético. Já o isobutano, embora apresente uma produção de energia elétrica mais alta, sofre com a redução de seu período produtivo, o que pode gerar desafios em termos de otimização contínua. Isso pode aumentar a complexidade e os custos operacionais ao depender de outro sistema para suprir a demanda fora de seu período de operação. Por fim, o tolueno, com sua menor eficiência tanto na produção de energia quanto na transferência de calor residual para a produção de água quente, pode ser considerado uma opção menos vantajosa em comparação com os outros fluidos.

Ademais, para o beneficiamento de jeans, o processo de produção geralmente ocorre em turnos diurnos, com a maior parte da atividade acontecendo entre as 07:00 e 17:00. A coincidência entre os horários de produção de energia elétrica e os turnos produtivos da planta é vantajosa, pois permite uma utilização contínua da energia gerada.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo simular e otimizar a produção de energia elétrica e calor de processo de uma planta heliotérmica localizada no agreste pernambucano, utilizando o calor residual do ciclo de geração de energia para aquecer a água utilizada no beneficiamento do jeans. A partir das simulações realizadas nos softwares SAM e ESS,

foi possível avaliar o desempenho da planta heliotérmica considerando diferentes fluidos de trabalho no ciclo Rankine Orgânico (ORC), como o benzeno, n-pentano, isobutano e tolueno, e observar a observação dessa tecnologia em uma região com alto potencial solar.

Os resultados mostraram que a produção de energia elétrica é mais eficiente entre as 07:00 e 16:00, com a maior produção ocorrida com os compostos benzeno e n-pentano, que atingiram uma produção média de 1.083 kW e 1.029 kW, respectivamente. A produção de água quente para o processo de beneficiamento do jeans também atingiu um padrão semelhante, com destaque para os mesmos fluidos orgânicos, que mantiveram uma produção constante de 20 kg/s durante o período de maior radiação solar.

Além disso, a escolha do fluido de trabalho desempenha um papel crucial no aumento da eficiência do sistema, especialmente nas condições climáticas do agreste pernambucano, onde a radiação solar é abundante. A análise das diferentes opções de fluido permitidas identifica o mais adequado para maximizar a produção combinada de energia elétrica e calor de processo, otimizando o desempenho do ciclo ORC e, conseqüentemente, o uso de energia térmica para aquecimento de água.

Os resultados também evidenciaram o potencial de integração de sistemas solares térmicos com cogeração como uma solução sustentável e econômica para atender à demanda energética de processos industriais. O uso do calor residual para aquecer a água no beneficiamento de jeans contribui para a redução de custos operacionais e diminuição da dependência de combustíveis fósseis, alinhando-se aos princípios de eficiência energética e sustentabilidade.

Esse estudo contribui significativamente para o entendimento da aplicação de plantas heliotérmicas em indústrias que necessitam de calor de processo e geração de eletricidade, como o beneficiamento de jeans. A utilização de ciclos ORC, em combinação com fontes de calor residual e sistemas solares, pode reduzir a dependência de fontes externas de energia, além de diminuir custos e aumentar a sustentabilidade das operações industriais.

Apesar das contribuições significativas, o estudo apresenta algumas limitações. A principal delas é a simulação de uma planta teórica, o que implica na ausência de validação dos resultados em um ambiente real. Outro ponto que limita a aplicabilidade dos resultados é a falta de análise mais detalhada sobre os custos iniciais e operacionais de instalação de uma planta heliotérmica, considerando a infraestrutura

necessária para armazenar e distribuir a energia gerada.

## 6 REFERÊNCIAS

- ABDELHADY, Faissal; BAMUFLEH, Hisham; EL-HALWAGI, Mahmoud M.; PONCE-ORTEGA, José María. Optimal design and integration of solar thermal collection, storage, and dispatch with process cogeneration systems. *Chemical Engineering Science*, v. 136, p. 158–167, 2015. ISSN 0009-2509..
- BAHAROON, Dhyia Aidroos; RAHMAN, Hasimah Abdul; OMAR, Wan Zaidi Wan; FADHL, Saeed Obaid. Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 41, p. 996–1027, 2015.
- BARBOSA, Eloiny Guimarães; MARTINS, Marcio Arêdes; ARAUJO, Marcos Eduardo Viana de; SANTOS RENATO, Natália dos; ZOLNIER, Sérgio; PEREIRA, Emanuele Graciosa; OLIVEIRA RESENDE, Michael de. Experimental evaluation of a stationary parabolic trough solar collector: Influence of the concentrator and heat transfer fluid. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 276, p. 124174, 2020.
- BIN ZHANG; ZHAOHUA WANG; BO WANG; DANISH, e. Produção de energia, crescimento econômico e emissão de CO<sub>2</sub>: evidências do Paquistão. *Natural Hazards*, 2017.
- BLAIR, N.; FERGUSON, T.; JANZOU, S. *System Advisor Model™, SAM™ 2014.1.14: Descrição geral*. Golden, CO, 2014. Acessado em 22 jan. 2025. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/61019.pdf>.
- CENGEL, Yunus A. *Thermodynamics: an engineering approach*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2011.
- COVENTRY, Joe; ANDRAKA, Charles. Dish systems for CSP. *Solar Energy*, v. 152, mar. 2017.
- CUIECA, Massoxi Mandela. *Aplicação de sais fundidos como fluido de transferência de calor de Usinas CSP de Calha Parabólica*. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2019.
- DUDLEY, Vernon E. et al. *Resultados de teste: coletor solar SEGS LS-2*. Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (Estados Unidos), 1994.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. *BEN. Balanço Energético Nacional 2023 – Ano base 2022: Relatório Síntese*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2023. Disponível em: <URL>. Acesso em: 27 ago. 2024.

ENERGY SECTOR MANAGEMENT ASSISTANCE PROGRAM; SOLARGIS; WB; IFC. *Global Solar Atlas*. 2021. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/?m=sq:ghi>. Acesso em: 15 jan. 2025.

EVENS, J.M.; SAN, Sau. Vegetation alliances of the San Dieguito River Park region, San Diego County, California. *California Native Plant Society*, Sacramento, Citeseer, 2005.

EZEANYA, Emeka K.; MASSIHA, Gholam H.; SIMON, William E.; RAUSH, Jonathan R.; CHAMBERS, Terrence L. System advisor model (SAM) simulation modelling of a concentrating solar thermal power plant with comparison to actual performance data. *Cogent Engineering*, Taylor & Francis, v. 5, n. 1, p. 1524051, 2018.

FERRER, E.; MEHOS, M. *System Advisor Model (SAM) Case Study: Andasol-1*. NREL, Aldeire, 2013.

FLURI, Thomas P. The potential of concentrating solar power in South Africa. *Energy Policy*, Elsevier, v. 37, n. 12, p. 5075–5080, 2009.

GUZMAN, L.; HENAO, A.; VASQUEZ, R. Simulation and optimization of a parabolic trough solar power plant in the city of Barranquilla by using system advisor model (SAM). *Energy Procedia*, Elsevier, v. 57, p. 497–506, 2014.

HACHICHA, A. A. et al. A review study on the modeling of high-temperature solar thermal collector systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 112, p. 280–298, 2019.

KALOGIROU, S. *Engenharia de Energia Solar: Processos e Sistemas*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2016. ISBN 9788535280050.

KALOGIROU, Soteris A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. [S.l.]: Elsevier, 2023.

KAMAL, Wafik A. *Bombeamento Solar de Água — Uma Visão Geral Analítica*. Edição: Universidade do Qatar. [S.l.: s.n.], 1988.

KESSELI, Devon; WAGNER, Michael; GUÉDEZ, Rafael; TURCHI, Craig S. CSP-plant modeling guidelines and compliance of the system advisor model (SAM). In: *AIP PUBLISHING*, 1. AIP Conference Proceedings. [S.l.: s.n.], 2019. v. 2126.

KURAVI, Sarada et al. Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. *Progress in Energy and Combustion*

*Science*, Elsevier, v. 39, n. 4, p. 285–319, 2013.

KURUP, Parthiv; TURCHI, Craig S. *Parabolic trough collector cost update for the system advisor model (SAM)*. [S.l.], 2015.

LEDESMA-JAIME, Reynaldo et al. Análisis dinámico estructural de un helióstato concentrador de energía solar. *Revista de Energía Química y Física*, v. 3, n. 8, p. 1–11, 2016.

LIU, Ming et al. Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 53, p. 1411–1432, 2016.

MASCARENHAS, Maíram. *Análise da viabilidade técnica e econômica da implantação de sistemas de cogeração operando com um Ciclo Rankine Orgânico*. Projeto de Graduação (Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS – SEBRAE. *Estudo econômico do arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano: relatório final*. Recife, Brasil, 2012.

MORAES, Pedro Lee. *Usina Híbrida Heliotérmica-Biomassa em Ciclo Rankine Orgânico*. 2017. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MOYA, E. Zarza. Innovative working fluids for parabolic trough collectors. In: *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*. [S.l.]: Elsevier, 2017. p. 75–106.

PEDROSA, Ivaldo Vasconcelos; DUARTE, Marta Maria Menezes Bezerra. II-147 – Avaliação do processo de lavagem “Destroyer” utilizado em lavanderia industrial de jeans na cidade de Toritama/PE. [S.l.: s.n.], [s.d.].

PHILIBERT, Cédric et al. *Technology roadmap: Solar thermal electricity*. Paris: International Energy Agency, 2014.

PROGRAM, Energy Sector Management Assistance. SOLARGIS, WB, IFC, Global Solar Atlas, 2021.

PY, Xavier et al. Thermal energy storage for CSP (concentrating solar power). In: *EDP SCIENCES. EPJ Web of Conferences*. [S.l.: s.n.], 2017. v. 148, p. 00014.

SCALCO, Patricia. *Análise óptica e térmica do receptor de um sistema de*

*concentradores Fresnel lineares*. Dez. 2016. Tese (Doutorado) – [S.l.], [s.n.].

SCHOEBERL, P.; BRIK, M.; BRAUN, R.; FUCHS, W. Treatment and recycling of textile wastewater—case study and development of a recycling concept. *Desalination*, Elsevier, v. 171, n. 2, p. 173–183, 2005.

SILVA MACÊDO, Jacqueline da; SOBRAL, Maria do Carmo Martins; SANTANA COSTA, Andréa Fernanda de; SILVA, Gilson Lima da; LACERDA LIMA, Clécio José de. Monitoramento tecnológico: impactos ambientais durante o beneficiamento do jeans. *Caderno Pedagógico*, v. 21, n. 8, e6958–e6958, 2024.

SIMÕES-MOREIRA, José. *Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética*. [S.l.: s.n.], mar. 2021. ISBN 978-8521637356.

SORIA, Rafael; SCHAEFFER, Roberto; SZKLO, Alexandre. Configurações para operação de plantas heliotérmicas CSP com armazenamento de calor e hibridização no Brasil. In: *ANAIS Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*. [S.l.: s.n.], 2014.

SOUZA, Leonardo Faustino Lacerda de; FRAIDENRAICH, Naum. *Concentrador linear Fresnel com geometria aplanática*. In: *ANAIS Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*. [S.l.: s.n.], 2020.

STALEY, Britt Childs et al. Juice from concentrate: reducing emissions with concentrating solar thermal power. *World Resources Institute*, 2009.

UMMEL, Kevin. *Concentrating solar power in China and India: a spatial analysis of technical potential and the cost of deployment*. Center for Global Development Working Paper, n. 219, 2010.

VANSLAMBROUCK, Bruno et al. Efficiency comparison between the steam cycle and the organic Rankine cycle for small scale power generation. In: *PROCEEDINGS of the Renewable Energy World Conference & Expo North America*, Long Beach, CA, USA. [S.l.: s.n.], 2012. p. 14–16.

WORDBANK, CPO. *Concentrating solar power*, 2020.

ZOHURI, Bahman. *Compact heat exchangers application in new generation of CSP*. In: [S.l.: s.n.], set. 2017. p. 339–354. ISBN 978-3-319-29834-4.