

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SIMULAÇÃO DE SISTEMA DE GERAÇÃO DE CALOR COM COLETORES DE
CALHA PARABÓLICA PARA PROCESSO INDUSTRIAL NO RIO GRANDE DO
SUL

por

Mathias Pinto Bercht

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Bercht, Mathias Pinto
SIMULAÇÃO DE SISTEMA DE GERAÇÃO DE CALOR COM
COLETORES DE CALHA PARABÓLICA PARA PROCESSO INDUSTRIAL
NO RIO GRANDE DO SUL / Mathias Pinto Bercht. -- 2021.
23 f.

Orientadora: Leticia Jenisch Rodrigues.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Geração de Calor. 2. Energia Solar. 3. Coletores
de Calha Parabólica. 4. Processos Industriais. I.
Rodrigues, Leticia Jenisch, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Mathias Pinto Bercht

SIMULAÇÃO DE SISTEMA DE GERAÇÃO DE CALOR COM COLETORES DE CALHA PARABÓLICA PARA PROCESSO INDUSTRIAL NO RIO GRANDE DO SUL

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin

Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Letícia Jenisch Rodrigues

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Andres Armando Mendiburu Zevallos

Prof. Dr. Guilherme Henrique Fiorot

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, novembro de 2021

DEDICATÓRIA

À minha família, por todo o apoio na condução da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, de uma forma ou de outra, estiveram comigo durante esta etapa tão importante de minha vida.

Em especial, agradeço aos meus pais, ao meu irmão e à minha namorada por serem meus maiores apoiadores e base de apoio.

SIMULAÇÃO DE SISTEMA DE GERAÇÃO DE CALOR COM COLETORES DE CALHA PARABÓLICA PARA PROCESSO INDUSTRIAL NO RIO GRANDE DO SUL

Mathias Pinto Bercht

berchtmathias@gmail.com

Resumo. Existe, mundialmente, uma tendência à procura de novas formas de geração de energia a fim de atender a demanda por redução de emissões impostas para as próximas décadas. Uma destas formas é a geração de calor por energia solar térmica para processos industriais, principalmente em ascensão em países desenvolvidos. Este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica e financeira da implementação de um sistema com coletores de calha parabólica em um processo industrial no Rio Grande do Sul. A partir de uma simulação com base nas restrições do local de instalação, dados climáticos da região e informações de coletores reais do mercado, é possível se obter um valor total para a geração de energia anual, perfis mensais e horários para a vazão mássica e temperatura, além de estimar o período de retorno do investimento em nove anos.

Palavras-chave: geração de calor, energia solar térmica, calha parabólica, processos industriais

Título em inglês *Parabolic Trough Heat Generation System Simulation for Industrial Process in Rio Grande do Sul*

Abstract. There is a worldwide tendency to look for new ways of generating energy to meet the demand for emission reductions imposed for the coming decades. One of these forms is the generation of heat by solar thermal energy for industrial processes, which is on the rise, mainly in developed countries. This work evaluates the technical and financial viability of implementing a system with parabolic trough collectors in an industrial process in the Rio Grande do Sul. It was possible to obtain a total value for annual energy generation, monthly and hourly profiles for mass flow and temperature, and estimate the payback period of the investment in nine years from a simulation based on the constraints of the installation site, climatic data from the region, and information from real collectors on the market.

Keywords: generation of heat, solar thermal energy, parabolic trough, industrial processes

1. Introdução

Diante de mudanças climáticas, aumentos de custos em combustíveis e uma maior preocupação ambiental, há uma tendência global à procura por fontes alternativas de geração de variadas formas de energia. Uma das formas que mais teve avanços tecnológicos e em seu uso, foi a energia solar, por meio do emprego de variados coletores, gerando, principalmente, energia elétrica, porém tendo também um grande potencial para a geração de energia térmica.

Segundo o relatório *Solar Heat Worldwide 2020*, da *International Energy Agency* (IEA) (WERNER et. al., 2020), a capacidade solar térmica no mundo em operação era de 501 GW_{th} , correspondendo a 715 milhões de metros quadrados de área de coletores e gerando 407 TW_h , equivalentes a mais de 240 milhões de barris de petróleo, evitando que uma enorme quantidade de gás carbônico fosse lançada à atmosfera.

Uma das formas de energia mais utilizada na indústria é o calor, portanto a utilização de fontes renováveis para a sua geração pode ser uma das principais alternativas para a diminuição da emissão de poluentes. Kalogirou afirma que a demanda de calor em processos industriais representa em torno de 15% de toda a necessidade energética em países do sul da Europa (KALOGIROU, 2009). Lauterbach afirma que, na Alemanha, a demanda de processos industriais representa 37% do total do calor necessário (LAUTERBACH, 2014). No Brasil, segundo o relatório *Energia Termossolar para a Indústria* (PHILLIP et. al., 2018), em torno de 80% da necessidade energética da indústria se dá na forma de calor, sendo a maior parte fornecido por fontes não renováveis.

As principais indústrias que necessitam de calor em temperaturas abaixo de 400 °C são a química, a de alimentos, a têxtil, a do papel, e o setor de máquinas. Todas estas têm grande relevância na indústria, tanto brasileira quanto mundial, o que indica o potencial do uso da energia solar térmica para as referidas indústrias. O emprego de energia solar térmica com eficiência, no entanto, ainda depende da solução de alguns desafios (LAUTERBACH, 2014). Entre estes desafios pode-se destacar a falta de uma metodologia simples para o dimensionamento dos sistemas que dê, tanto para fabricantes e projetistas, quanto para os consumidores, uma maneira simples avaliar os benefícios da energia solar térmica.

No relatório *Solar Heat for Industrial Processes* (IRENA, 2015), a Agência Internacional de Energias Renováveis indica que entre as principais barreiras para a aplicação de sistemas de geração de calor com energia solar para indústria estão a falta de opções de financiamento, subsídios para combustíveis fósseis e a pequena escala da aplicação. Porém, diante do panorama observado, percebe-se os benefícios possibilitados por maiores esforços na mitigação desses desafios por meio da implementação desses sistemas ao redor do mundo e, principalmente, no Brasil devido ao grande potencial solar existente.

Por meio deste trabalho pretende-se levar ao leitor um maior entendimento sobre o potencial e a tecnologia de aproveitamento da energia solar para geração de calor. Apresentar-se-á uma breve fundamentação teórica sobre os principais pontos, focando em coletores de calha parabólica e, a seguir, um estudo de caso da tecnologia, com os resultados focados na avaliação da viabilidade física e financeira.

1.1. Objetivos

- Objetivo Geral: a partir da análise realizada sobre o potencial da energia solar térmica, apresentar a simulação de um sistema de geração de calor com energia solar térmica para um processo industrial no Rio Grande do Sul.
- Objetivos Específicos: avaliar a viabilidade do sistema em termos físicos, comparando a capacidade de geração de calor com as restrições impostas, e financeiros, comparando os custos da implementação e operação do sistema com a economia em combustível alcançada.
- Objetivos Secundários: instigar o uso de fontes renováveis de energia na indústria brasileira como forma de diminuir a emissão de poluentes e propor uma metodologia para a avaliação do potencial de geração de calor para processos industriais.

Não são partes dos objetivos deste trabalho a análise da utilização do calor gerado e as perdas devido à integração com o sistema já existente assim como a avaliação dos custos de integração do sistema de geração de calor com a estrutura já existente.

2. Fundamentação Teórica

Na seção a seguir, são explorados alguns dos principais conceitos a respeito de energia solar térmica necessários para a compreensão do trabalho.

2.1. Recurso solar

Estima-se que apenas 84 minutos da pequena fração de radiação solar que encontra o planeta é capaz de suprir toda a necessidade energética de um ano. Entretanto, essa energia não é uniforme e, portanto, são necessários diversos ajustes para uma utilização adequada desse recurso.

Alguns dos principais ajustes necessários se dão em função da variação da distância e posicionamento entre o Sol e a Terra ao longo do ano. Em função disso, sistemas de aproveitamento da energia solar devem ser projetados considerando fatores de ajuste para o tempo de exposição e os ângulos de incidência de irradiação, entre outros. Em relação aos ângulos, destacam-se o ângulo de inclinação, o ângulo horário e o ângulo de azimute, e o ângulo de incidência.

A radiação solar pode ser dividida, em termos geométricos, em duas componentes: a radiação direta, que provem unicamente do disco solar, e a radiação difusa, que tem como origem a própria atmosfera terrestre. A radiação total é a soma destas duas componentes. Entre várias diferenças, uma das principais é o respectivo comprimento de onda.

Os dois principais itens que devem ser observados em sistemas de geração de calor a partir de energia solar são a radiação solar e a temperatura ambiente do local onde o sistema será instalado. Estes dados podem ser obtidos em mapas solares, que fornecem panoramas baseados em dados climatológicos coletados ao longo do tempo. A partir dos mapas, podem ser feitas as avaliações dos mais variados sistemas de aproveitamento desta eficiente fonte de energia.

2.2. Tipos de coletores

Existem diversos tipos de coletores disponíveis no mercado, vários dos quais podem ser observados na Figura 1 abaixo. Cada um dos sistemas apresenta suas capacidades de geração de calor, custos de fabricação e operação e disposição solar necessária. Em sistemas onde não são necessárias temperaturas elevadas, é possível a utilização de coletores de placa plana, que possuem ótimo custo benefício e uma tecnologia já bem desenvolvida, principalmente para aplicações residenciais. Entretanto, sendo necessárias temperaturas mais elevadas e uma maior geração de calor, outros tipos de coletores devem ser avaliados.

Coletores de calha parabólica, representados na Figura 1d, são feitos a partir de um dobramento de um material refletivo, formando uma parábola. No seu ponto focal é disposto um tubo preto, por vezes coberto com uma camada de vidro a fim de evitar perdas de calor, onde o fluxo de fluido passa é aquecido, em um processo que transforma a radiação solar em calor utilizável.

Tais coletores são uma ótima maneira para criar sistemas com estruturas leves e de baixo custo para gerar calor em temperaturas médias. Eles são capazes de gerar calor em temperaturas de até 400 °C, tanto para geração de eletricidade, quanto para aplicações onde o calor é necessário (KALOGIROU, 2009).

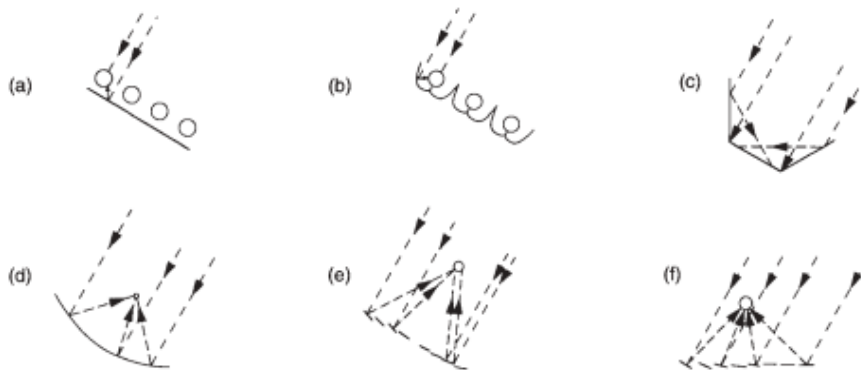


Figura 1 - Diversos tipos de coletores solares. (a) Placa plana; (b) Tubo Evacuado; (c) Placa plana com refletores; (d) Calha Parabólica (e) Linear Fresnel; (f) Conjunto de coletores com receptor central. Fonte: DUFFIE et. al., 2013.

2.3. Análise óptica e térmica de coletores de calha parabólica

Na Figura 2 abaixo podem ser observados os principais ângulos e as principais medidas existentes em um coletor de calha parabólica. Começando pela dimensão f , que é a distância focal do coletor. Esta define o afastamento entre o centro do coletor e o centro do receptor no eixo do coletor e é diretamente ligada à equação da parábola utilizada para coletores de calha parabólica. A distância D , representando o diâmetro do tubo do receptor, também é importante: o tubo pode ser definido a partir da distância r_r e do ângulo θ_m , que são, respectivamente, a distância entre o coletor e o receptor nas extremidades da parábola e semiângulo de aceitação. Outro conceito relevante deste tipo de coletores é o do ângulo de aro, φ . O valor máximo deste é atingido na extremidade do

coletor, onde é chamado de φ_r . Por fim, na extremidade inferior da Figura 2 pode-se observar a dimensão W_a , que é definida como a largura do coletor.

A partir dos conceitos básicos acima, pode-se obter os valores para a razão de concentração, que é razão da área de abertura de um coletor e a área do receptor, a abertura da parábola, e o comprimento de arco, S . Outro conceito de grande importância a ser definido é o “*latus rectum*” da parábola, que é sua abertura no ponto focal.

Por fim, cabe introduzir alguns conceitos de eficiência óptica, razão entre a energia absorvida pelo receptor e a energia total incidente na abertura do coletor. A eficiência é principalmente dependente dos materiais utilizados, da geometria do coletor e de possíveis imperfeições na sua superfície. Três dos principais itens da eficiência óptica são o fator geométrico, A_f , que contabiliza a redução da área de abertura do coletor devido a incidência anormal, o efeito do final, A_e , que contabiliza perdas devido a radiação refletida e a área de bloqueio, A_b , que soma os efeitos de sombreamento de parte do refletor

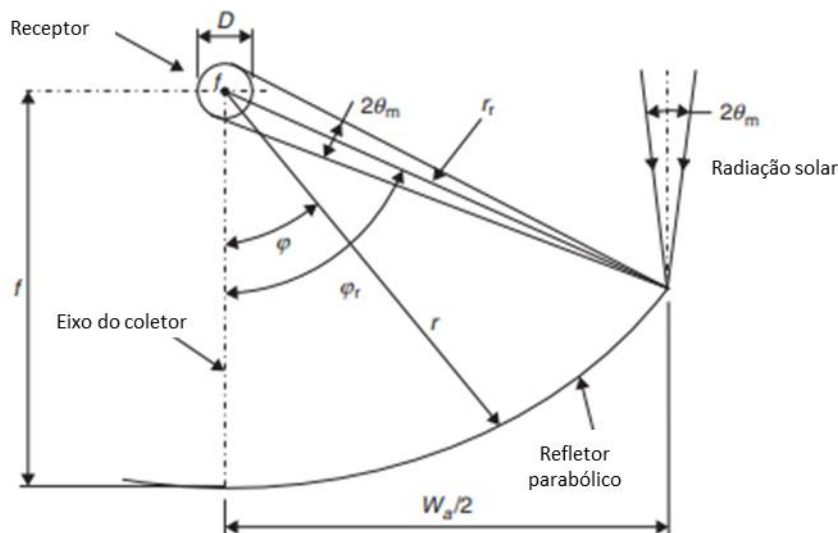


Figura 2 - Representação de um coletor de calha parabólica, seus principais componentes, dimensões e ângulos. Adaptado de KALOGIROU, 2009.

Após definida a energia absorvida, deve-se avaliar as perdas térmicas no receptor. Comumente são analisados dois casos para coletores de calha parabólica, receptores com tubos envidraçados e tubos descobertos. A grande vantagem do primeiro é a redução das perdas de calor nos tubos por convecção em virtude da existência de vácuo entre a parede do tubo receptor e a camada de vidro. Entretanto, este método agrega custos ao sistema e, portanto, sua aplicação deve ser avaliada em cada projeto.

Para os casos de tubos descobertos, o coeficiente global de perdas é uma soma simples das perdas em virtude do vento, h_w , das perdas por irradiação, h_r , e das perdas por condução no suporte, h_c . Para tubos com coberturas envidraçadas, pode-se descartar as perdas por convecção em função do vento, entretanto deve ser realizada uma análise mais detalhada das parcelas de perda entre a cobertura e o ar, baseando-se na área do receptor, e nas perdas entre o tubo e a cobertura, reduzidas em função do vácuo. Com base no coeficiente global de perdas, pode-se encontrar o coeficiente de transferência de calor total, também dependente das perdas internas para o fluido de trabalho.

A partir de um balanço de energia no receptor, obtém-se a eficiência instantânea, η_o . Para se chegar nela, dois conceitos muito importantes são desenvolvidos, o fator de eficiência do coletor e o fator de remoção de calor do coletor. O primeiro é definido como a razão entre o coeficiente de transferência de calor total e o coeficiente global de perdas, enquanto o segundo é uma relação entre propriedades do fluido de trabalho e do material do tubo.

Coletores de calha parabólica têm uma redução muito menor na eficiência, em comparação com outros, conforme aumenta-se a diferença entre a temperatura do fluido de trabalho e a ambiente. Isto se deve ao fato de que as perdas térmicas são inversamente proporcionais à razão de concentração. Esta é a grande vantagem de coletores concentradores, tornando-os aptos a aplicações de alta temperatura (KALOGIROU, 2009). Na Figura 3 abaixo pode-se observar o efeito da razão de concentração, tornando a curva de perda de eficiência menor conforme aumenta-se a diferença de temperatura entrada do fluido e temperatura ambiente.

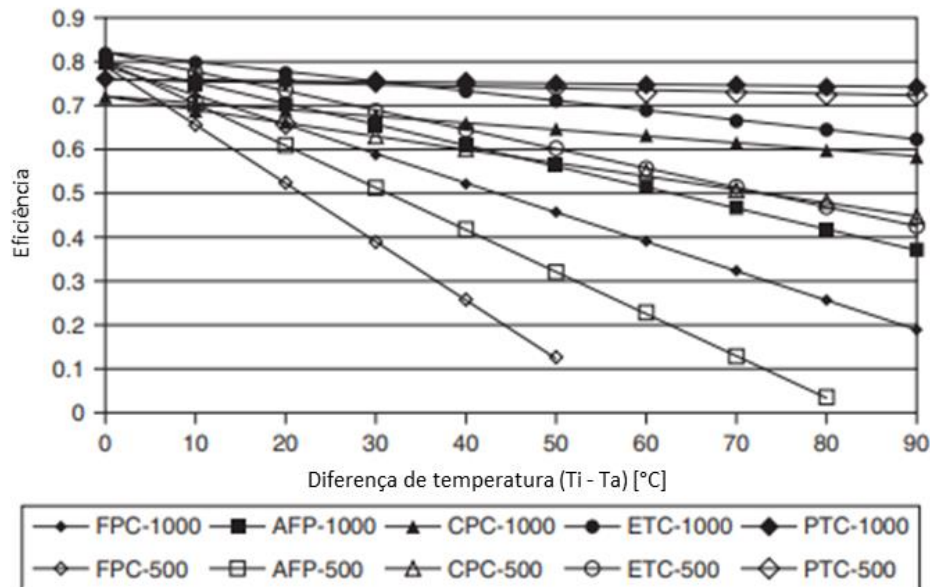


Figura 3 - Comparação da eficiência de diferentes tipos de coletores para diferentes valores de diferença entre a temperatura do fluido de trabalho e temperatura ambiente. Na figura, os coletores com iniciais PTC representam os de calha parabólica. Adaptado de KALOGIROU, 2009.

3. Metodologia

Nesta seção, é apresentada a metodologia utilizada para a simulação do estudo de caso escolhido.

3.1. Avaliação do local

Existem diversas características que devem ser avaliadas a fim de se realizar uma boa escolha de local para a implementação de um sistema de geração de calor com energia solar térmica. Devem ser analisados aspectos geográficos, para atestar a disponibilidade do recurso solar ao longo do ano e aspectos climatológicos, a fim de se verificar

temperaturas médias, as características de precipitação da região e sistemas meteorológicos atuantes nas estações do ano. Por fim, outro fator limitante para a geração de calor é a própria disponibilidade de área para a instalação do sistema e a sua direção de instalação nas áreas disponíveis.

Para a realização do trabalho, foi definida a aplicação de um sistema de geração de calor para um processo industrial. Portanto é considerada disponível para a instalação dos coletores a área de teto da fábrica, assumindo que os espaços ao redor são destinados ao processo fabril.

A fim de se encontrar as características geográficas e climatológicas do local da operação, são utilizados atlas de disponibilidade de energia solar. O Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia junto com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais elabora o Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2017), cuja segunda edição é a utilizada para realizar a análise qualitativa do local escolhido para a avaliação do sistema neste trabalho. Para possibilitar um maior detalhamento dos recursos na região definida para o trabalho, também se utiliza o Atlas Solar Rio Grande do Sul (KREZNINGER et al., 2017). Para a avaliação quantitativa são necessários dados numéricos a respeito do clima, que foram obtidos junto ao Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, da Universidade Federal de Santa Catarina. Tais dados foram utilizados nas simulações realizadas para a avaliação técnica do sistema.

3.2. Simulação da geração de calor

Após a definição da área onde será instalado o sistema de captação da energia solar, o próximo passo é a análise da capacidade de geração de calor do local escolhido. Existem diversas formas de serem realizadas análises e diversas aplicações para a avaliação da geração de calor a partir de energia solar térmica. A fim de atender aos objetivos do trabalho com praticidade e objetividade, definiu-se a utilização do software *System Advisor Model* (SAM) (versão 2020.11.29), desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory*, (NREL), Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos Estados Unidos.

O SAM é um software gratuito que permite análises de performance e financeiras de diversos tipos de energias renováveis. A partir de dados climatológicos, das especificações definidas para o sistema e das perdas projetadas é calculada a geração de energia e, com essa, é feita a análise financeira. O software pode ser utilizado para realizar simulações das mais diversas energias renováveis, desde energia eólica até geotérmica. Os resultados das simulações são fornecidos com detalhamento anual da energia gerado e do retorno financeiro, de maneira a facilitar a programação da utilização do sistema projetado. Os maiores benefícios dessa abordagem são a capacidade de alterar os parâmetros de entrada e poder avaliar os impactos dessas mudanças na performance do sistema (WAGNER et al., 2011). Como desvantagem, cita-se a possibilidade maiores incertezas na modelagem e maior divergência com sistemas reais.

Para o estudo de caso definido, onde serão utilizados coletores de calha parabólica para a geração de calor, deve ser utilizado o modelo *Parabolic Trough – Heat*. O modelo foi desenhado para criar uma avaliação da performance de sistemas de coletores de calha parabólica utilizando as propriedades geométricas e físicas destes. O modelo físico

caracteriza um coletor de calha parabólica a partir dos princípios de transferência de calor e termodinâmica.

O SAM calcula os valores das taxas de energia absorvida no receptor com base em um balanço de energia entre o que é recebido do coletor, na forma de radiação, e as perdas, na forma de radiação e convecção para o ambiente. Todos os princípios físicos utilizados para as simulações são amplamente discutidos por Rothermund (ROTHERMUND, 2021) e Wagner e Gilman (WAGNER et., al., 2011). Na Figura 4 abaixo são ilustrados os processos de transferência de energia, o recebido e o perdido.

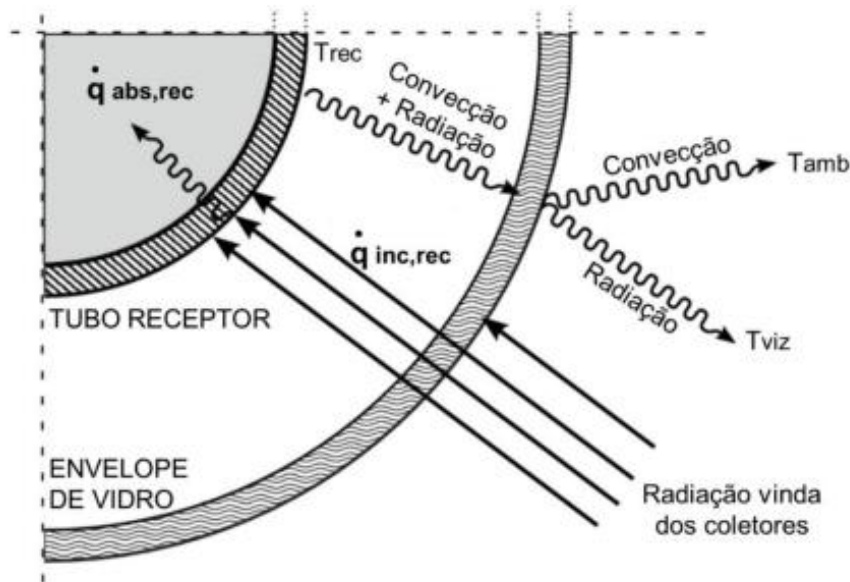


Figura 4- Processos de transferência de energia no receptor. Fonte: ROTHERMUND, 2021.

Para a realização de uma análise, é necessário fornecimento apenas dos parâmetros de entrada do projeto. Isto é, são fornecidos os dados climatológicos com o maior nível de detalhe possível, os dados de entrada do sistema de geração de calor, como as temperaturas de entrada e saída do fluido de transferência de calor, as propriedades e dimensões dos receptores e coletores que serão utilizados e outros dados do sistema de armazenamento de calor e controle dos coletores. Para a definição da potência de projeto, utilizou-se um processo iterativo manual, também com o auxílio do SAM, onde, sabendo a limitação imposta pela área total disponível e pelo tamanho mínimo dos conjuntos de coletores, estimou-se a potência até chegar-se no tamanho máximo imposto pelas restrições.

3.3. Modelo de análise financeira

Para verificar se o sistema projetado possui viabilidade, além dos parâmetros físicos, também deve se avaliar sua capacidade de gerar retorno sobre o investimento necessário. Com os resultados do calor gerado para um determinado sistema, o SAM fornece uma avaliação financeira comparativa com outros tipos de tecnologia. Para isto devem ser adicionados na simulação dados sobre o investimento necessário e os custos de operação previstos. Para uma análise mais detalhada, também podem ser adicionados dados sobre a inflação prevista, o rendimento do sistema e sua depreciação.

No trabalho proposto será feita uma análise do tempo para que a instalação se pague - *payback*- considerando valor presente líquido (VPL). Serão considerados como custos o valor de investimentos iniciais no projeto, custos de operação e manutenção, além de valores para juros e inflação. O retorno financeiro do projeto é avaliado a partir da quantidade de energia anual gerada, sendo esta considerada com a economia em combustível utilizado. Para auxiliar na comparação entre as possíveis formas de geração de calor para o calor proposto, também será avaliado o Custo Linearizado de Geração de Calor (LCOH). Para ambas métricas, o tempo de referência utilizado foi de 15 anos, razoável para investimentos em itens capitalizáveis na indústria. Os modelos utilizados para a realização do cálculo de ambas as métricas assim como os valores de referência utilizados estão em acordo com os apresentados em (ROTHERMUND, 2021) e em (SHARMA et al., 2018). Na Tabela 1 abaixo observa-se os custos relacionados à sistemas de geração de calor com coletores de calha parabólica.

Tabela 1 - Resumo dos parâmetros financeiros considerados para o campo solar.
[ROTHERMUND, 2021; SHARMA et. al., 2018]

Coletor de Calha Parabólica	
Investimento Inicial	300 US\$/m ²
Custos Anuais	3 US\$/m ²
Retorno Esperado	Definidos em resultados

Para o cálculo do VPL, foram utilizados como parâmetros de entrada o valor de investimento inicial do empreendimento, custo fixo e invariável com o tempo, a economia estimada pela menor necessidade de gás e os valores de operação e manutenção do campo solar e uma taxa de atratividade mínima. Ao final do tempo de referência utilizado, espera-se que o valor final seja positivo, indicativo de que o projeto é financeiramente viável.

O LCOH é uma variável adaptada do Custo Linearizado de Eletricidade, LCOE, e é uma métrica que fornece o custo associado a cada unidade de energia fornecida para o sistema. É dependente do custo inicial, da energia gerada e os custos de operação e manutenção. A análise do LCOH do gás natural, combustível a ser economizado segue os mesmos passos apresentados por Rothermund (ROTHERMUND, 2021).

3.4. Estudo de caso

Abaixo se apresenta as características da aplicação escolhida e se fazem algumas definições para o restante da avaliação.

3.4.1. Aplicação

Foi escolhido para a avaliação do sistema de geração de calor com energia solar térmica um processo produtivo na cidade de Gravataí, no Rio Grande do Sul, dentro de uma planta industrial coberta, em um pavilhão com aproximadamente 60.000 m², dos quais 38.000 m² são aproveitáveis para a instalação de coletores solares por estarem em

um mesmo nível e formando um formato retangular. A operação a ser atendida é a pintura de uma indústria automotiva, e o calor gerado será fornecido para as estufas de cura.

O processo de pintura começa por uma etapa de preparação da superfície, com banhos ácidos, seguida da aplicação da primeira camada de tinta, que serve como proteção contra oxidação. Após, aplica-se os selantes necessários e então a segunda camada de tinta, que serve como base para cor e é a camada que garante a resistência contra deformações e arranhões. Por fim, aplica-se a última camada, que confere brilho ao material. Após cada camada, os produtos passam pelas estufas, que possuem diferentes características de operação. A temperatura requerida para as estufas fica entre 200 °C e 130 °C. A maior temperatura é aplicada na primeira camada, a camada média requer uma temperatura na faixa de 160 °C para a correta cura, enquanto a menor temperatura é utilizada para camada mais exterior. Observa-se, portanto, que as temperaturas atingidas estão bem dentro da faixa de operação de coletores de calha parabólica.

A operação funciona durante todas as horas do dia e a área de aplicação deve ser mantida aquecida ao longo de finais de semana. Portanto pode ser considerado que o calor gerado é aplicado instantaneamente, sem necessidade de um sistema de armazenagem térmica.

3.4.2. Parâmetros de entrada

O primeiro passo para a realização da simulação foi a definição dos dados do recurso solar no local escolhido. Foram utilizados dados do repositório *Climate One Building*, repositório com grande quantidade de dados climáticos de diversos locais do mundo. A base utilizada compila dados do clima entre 2003 e 2017 e os apresenta em forma horária para o software. Como critério de escolha, definiu-se a menor distância entre a estação de monitoramento e a aplicação, o que resultou na utilização de informações coletadas no aeroporto de Porto Alegre. Na Figura 5 abaixo pode se avaliar qualitativamente a distribuição do recurso solar no território brasileiro a partir do mapa

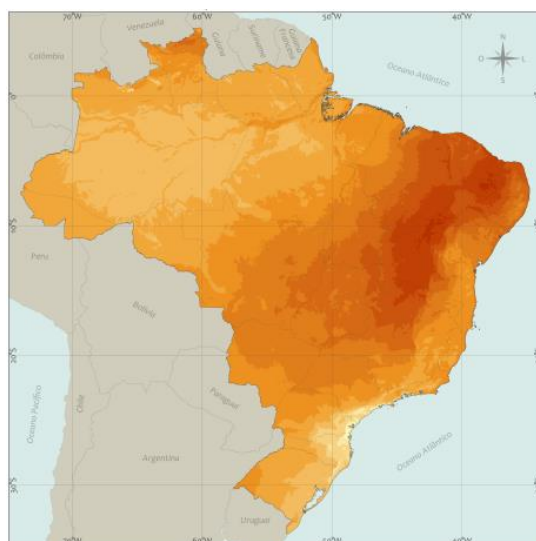


Figura 5 - Mapa da média do total de irradiação global horizontal em território brasileiro. Adaptado de Atlas Brasileiro de Energia Solar 2018. Fonte: PEREIRA et., al., 2017.

da média do total diário da irradiação global horizontal, do Atlas Brasileiro de Energia Solar 2018 (PEREIRA et al., 2017).

A seguir, foram definidos os primeiros parâmetros para auferir o tamanho do campo solar necessário. O primeiro valor escolhido foi a Irradiância Normal Direta (DNI) de projeto. Utilizou-se o valor indicado em (ROTHERMUND, 2021) de 755 W/m². Outros parâmetros a serem definidos foram as temperaturas de entrada e saída do conjunto de coletores. Definiu-se como temperatura de entrada 20 °C, próximo à temperatura média do local, 19,8 °C. Para a saída do fluido de trabalho, foi definido uma temperatura máxima de 220 °C, suficientemente grande para cobrir a temperatura máxima necessária na aplicação.

O próximo passo foi a definição do modelo de coletor solar a ser utilizado. No software utilizado, já existe uma lista com diversos modelos de coletores, com suas informações técnicas. A partir desses, definiu-se o uso do modelo SGX-1, da empresa Solargenix devido ao fato da disponibilidade das informações deste. Na Tabela 2 abaixo podem ser vistos os principais parâmetros do dispositivo.

Tabela 2 - Parâmetros principais do coletor solar utilizado para as simulações

Coletor Solar	Área de Abertura por Módulo	Comprimento por Módulo	Módulos por Conjunto	Área de Abertura do Conjunto
SGX-1, Solargenix	470,3 m ²	8,3 m	12	5643,6 m ²

Para completar o conjunto e estimar o tamanho do sistema a ser montado, foi escolhido também o receptor. A escolha deste também foi feita a partir dos disponíveis no SAM, com o mesmo critério dos coletores. O modelo escolhido foi o CSP RTUVR 70M4, da empresa Royal Tech. As principais características do equipamento podem ser observadas na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Parâmetros principais do receptor solar utilizado para as simulações

Receptor Solar	Diâmetro do Tubo	Diâmetro do Envelope	Absortividade do Tubo	Emissividade do Tubo	Transmissividade do Envelope
70M4, Royal Tech	0,07 m	0,125 m	0,953	0,053	0,961

4. Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados das avaliações realizadas para o estudo de caso apresentado na seção anterior. Os resultados são divididos entre a avaliação técnica, focada na geração de calor, e a avaliação financeira, utilizando os valores obtidos na primeira para aferir o retorno esperado.

4.1. Avaliação técnica

Os primeiros resultados a serem avaliados são o da energia térmica de projeto e da área total do sistema de geração de calor, com o processo iterativo com auxílio do SAM. Os parâmetros obtidos para potência de projeto, área total, potência total e o múltiplo solar foram utilizados nas simulações posteriores e podem ser avaliados na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4 - Área total dos coletores solares e potência térmica total do sistema

Área e Potência do Sistema de Geração de Calor	
Potência térmica de projeto	6,000 MW _{th}
Área total do conjunto de coletores	11.287 m ²
Potência térmica total do sistema	6,105 MW _{th}
Múltiplo solar	1,018

Limitado pelas áreas de teto disponível e pelo tamanho do conjunto de coletores, a partir do processo iterativo chegou-se em uma potência de projeto de 6 MW_{th}. Isto resultou na utilização de dois conjuntos de coletores, e uma potência 1,8% maior que a de projeto, resultando em um pequeno valor para o múltiplo solar, já esperado pela definição de que a energia gerada seria utilizada instantaneamente, sem a necessidade de armazenamento de calor.

A partir desses valores e do perfil horário diário dos dados climáticos, pode se estimar a energia total gerada pelo sistema de geração de calor. Este total de calor é o valor de referência para as posteriores avaliações financeiras. A partir dessa medida também pode ser avaliada a energia térmica específica gerada por cada unidade de área dos coletores. Esta medida é de grande valia para a realização de comparações com outros sistemas de geração de calor por energia solar térmica, além de servir como referência para melhorias. Por fim, também se obtém também o fator de capacidade do sistema. Esta medida também tem grande importância na avaliação de melhorias que devem ser feitas para garantir maior aproveitamento do recurso. Na Tabela 5 abaixo observam-se estes valores.

Tabela 5- Total de energia anual gerada pelo sistema e avaliação da capacidade atingida.

Energia Gerada pelo Sistema de Geração de Calor	
Energia total gerada	7836,688 MWh
Energia específica	0,694 MWh/m ² ano
Fator de capacidade	14,9%

Na Tabela 5 acima observa-se que o total de energia gerado pelo sistema é uma quantidade significativa de calor, evidenciando uma capacidade considerável de substituir a utilização de combustíveis fósseis ao longo do dia. Em função da confidencialidade dos dados de consumo da aplicação estudada, não se pode divulgar a fatia que seria de fato economizada. Em relação à energia específica, ao comparar-se com os dados do sistema de geração de calor projetado por Rothermund (ROTHERMUND, 2021), verifica-se que os valores estão na mesma faixa, indicando a convergência das simulações realizadas. O

baixo valor para o fator de capacidade pode ser explicado pelo tamanho do sistema de geração de calor, além da incidência solar disponível. Adicionando uma maior área de coletores e utilizando um múltiplo solar mais alto mudaria os parâmetros de operação do sistema, o que poderia acarretar no aumento do fato de capacidade (MADAENI et. al., 2011).

Ao longo do ano, devido às variações do recurso solar, observa-se uma grande variação na energia gerada. Analisando-se os perfis da vazão mássica de fluido de troca de calor e da temperatura deste fluido, pode-se observar nitidamente os impactos da diferença de recurso. Segundo a bibliografia consultada, é esperada uma grande diferença no comportamento de geração de calor em coletores de calha parabólica entre os meses de verão e inverno devido ao fato de que estes captam somente a componente longitudinal do recurso solar (ROTHERMUND, 2021). Na Figura 6 abaixo observamos os perfis de vazão mássica média, temperatura média e DNI médio para os meses de solstícios e equinócios. Para a análise, foi restrito o horário entre 7:00 e 19:00.

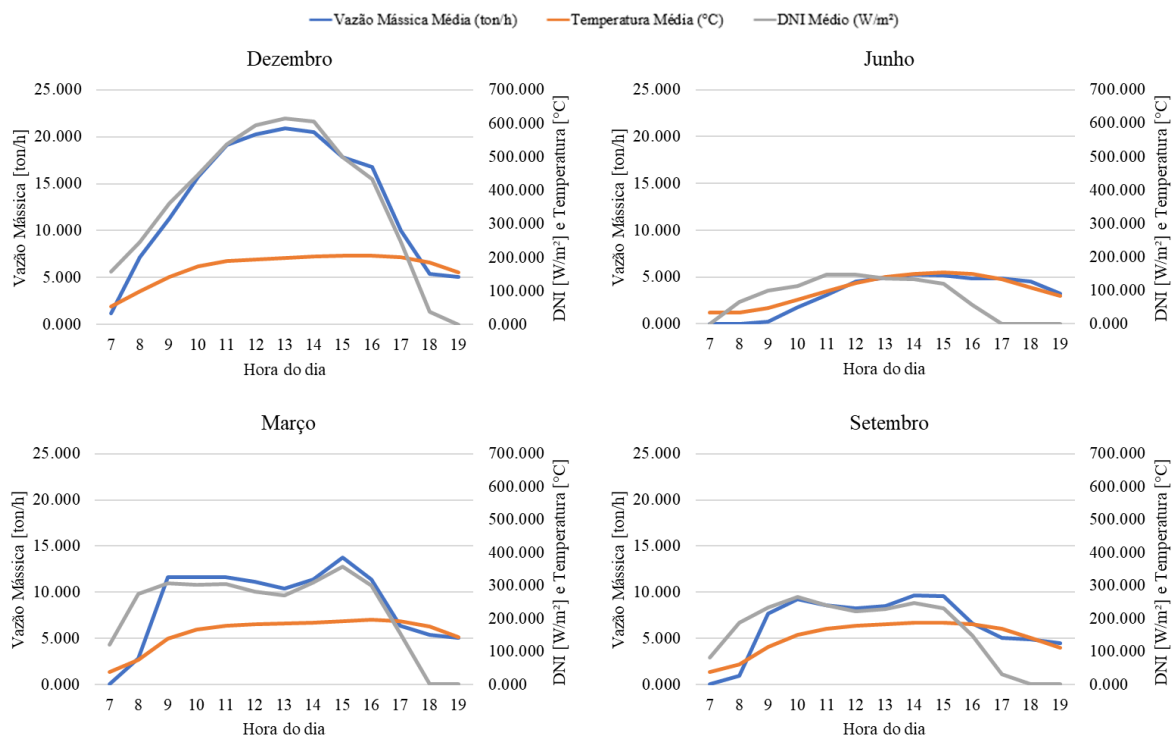


Figura 6 - Perfis horários de vazão mássica média, temperatura do fluido de trabalho média e DNI médio ao longo dos meses de solstícios e equinócios. Fonte: Autor.

Ao se observar os gráficos acima, um dos destaques é a grande variação do DNI em cada um dos solstícios. Em dezembro, no solstício de verão, chega-se a um DNI médio de mais de 600 W/m² em determinado momento do dia, ao passo que em junho, no início do inverno, o valor médio máximo não passa de 100 W/m². O impacto disto é observado em ambas as métricas: vazão de fluido de troca de calor e temperatura.

Em dezembro, ao longo do período de horas analisado, temos uma vazão maior que 5 ton/h já a partir da primeira hora do dia e uma temperatura próxima a máxima de projeto mantida entre 10:00 e 18:00, mostrando uma grande efetividade. Ao longo de junho, entretanto, pode-se verificar que a vazão média chega, no máximo, em 5 ton/h e a temperatura média em 150 °C a partir da quarta hora do período analisado. Embora ainda

gerando um efeito positivo para o sistema, ou seja, reduzindo a necessidade de consumo de combustíveis fósseis.

O comportamento das métricas observadas nos meses de equinócio, março e setembro, é, até certo ponto, muito parecido, podendo observar que o formato das curvas tem os mesmos padrões. Em ambos os períodos a vazão atinge rapidamente 10 ton/h, enquanto a temperatura passa de 150 °C ao longo da maior parte do período.

Por fim, também se avalia a energia térmica absorvida pelo sistema de receptores ao longo do período. Esta análise evidencia o perfil já observado com a vazão e temperatura, mostrando uma geração média muito superior durante os meses de verão. Abaixo, na figura 7, verifica-se a energia média absorvida em cada mês em comparação com o DNI médio.

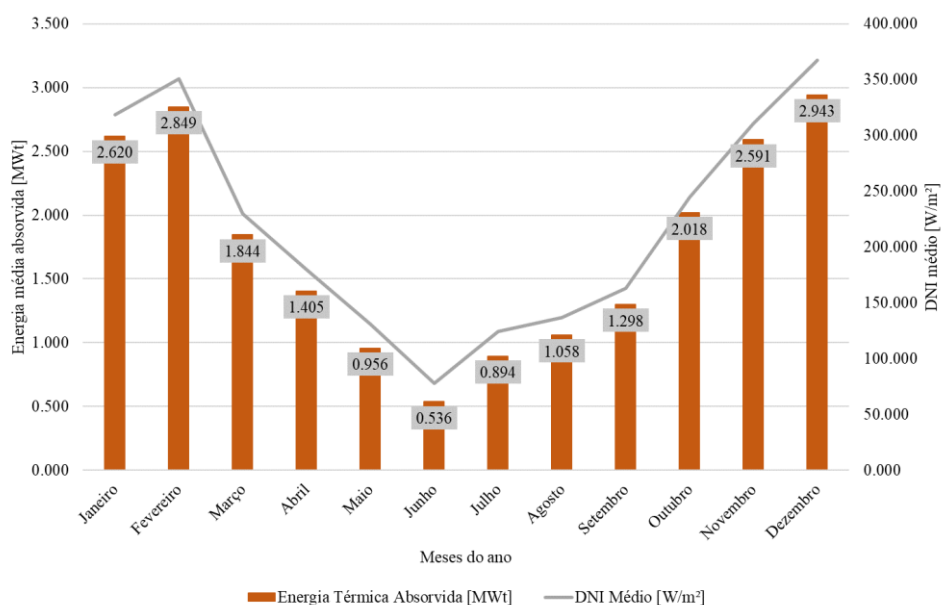


Figura 7 - Energia térmica média absorvida e DNI médio nos meses do ano.

Fonte: Autor

Na Figura 7 acima, pode-se observar a clara correlação entre a energia gerada e o recurso solar incidente. Também se percebe a clara diferença na energia média entre os meses de inverno e verão, sendo a energia média em dezembro em torno de 5,5 vezes maior do que a de junho. A partir da figura pode-se deduzir que o período onde o calor gerado resultará na maior economia de combustível é entre novembro e fevereiro, sendo o mês com maior energia média dezembro. A Tabela 6 a seguir corrobora com os dados, mostrando os ângulos de incidência médios e a eficiência ótica média em cada um dos meses do ano.

Tabela 6 - Ângulo de incidência médio e eficiência ótica média ao longo do ano.

Mês	Ângulo de Incidência Médio [°]	Eficiência Ótica Média
Março	15,876	0,587
Junho	28,245	0,380
Setembro	18,510	0,546
Dezembro	6,364	0,638

Na Tabela 6 acima observa-se com clareza que, nos meses de inverno, o ângulo de incidência solar aumenta consideravelmente, diminuindo a componente vertical, que é a única aproveitada pelos coletores de calha parabólica. Também pode-se ver que a eficiência ótica nos meses de inverno é aproximadamente a metade da do valor dos meses de verão, também explicando o enorme impacto na quantidade de energia gerada nesses meses.

4.2. Avaliação financeira

Para garantir que é vantajoso para empresas que estão buscando diminuir seus custos com combustíveis a instalação de sistema de geração de calor a partir de energia solar térmica, a principal análise realizada é a do retorno financeiro. Considerando a aplicação já apresentada, na Tabela 7 são vistos os valores de investimento necessário e taxas inerentes à investimentos considerados para a verificação do tempo para o retorno financeiro do projeto.

Tabela 7 - Valores considerados para o investimento no sistema de geração de calor.

Valores Iniciais de Projeto	
Investimento Inicial	US\$ 3.386.100
Custo Anual Operação	US\$ 33.861
Taxa de Atratividade Mínima	9% a.a.

A economia de combustível esperada foi avaliada a partir da quantidade anual de energia gerada, sem avaliação dos impactos mensais. Na Figura 8 abaixo é possível ver o comportamento do VPL no período de 15 anos considerado para a análise.

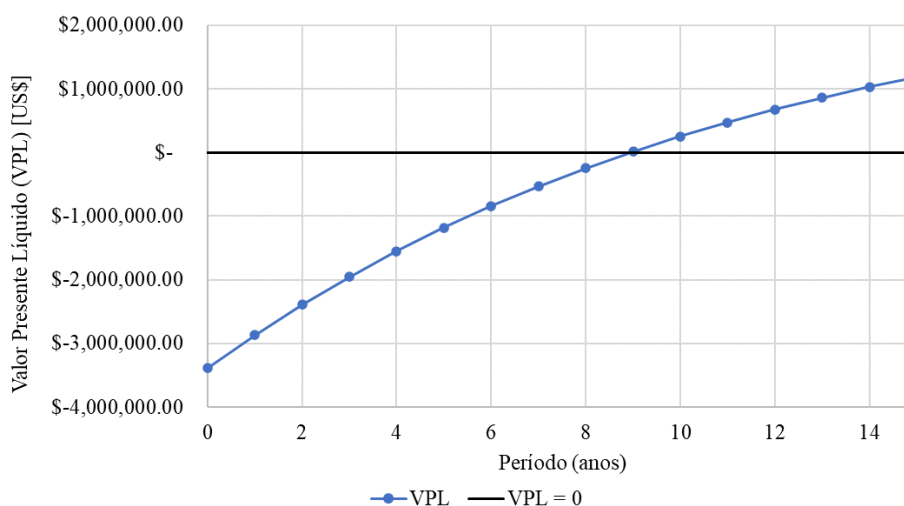


Figura 8 - Comportamento do Valor Presente Líquido para o sistema de geração de calor projetado. Fonte: Autor

Acima observa-se que o valor presente líquido atinge a linha de valor presente líquido zero, ou seja, o ponto de *payback*, no nono ano após o início da operação do

projeto. Após este período, é esperado que toda economia seja efetiva para a empresa e indica que, caso sejam feitos empréstimos para a instalação da operação, em um prazo de nove anos, ainda que com uma taxa de juros elevada, a empresa, somente com a economia gerada, quitá-los-á.

Com a análise do Custo Linearizado de Calor (LCOH), é realizada uma comparação direta entre o custo da geração de calor a partir do sistema solar e a partir do sistema com gás natural durante o período analisado. Abaixo, na Figura 9 é observada essa comparação.

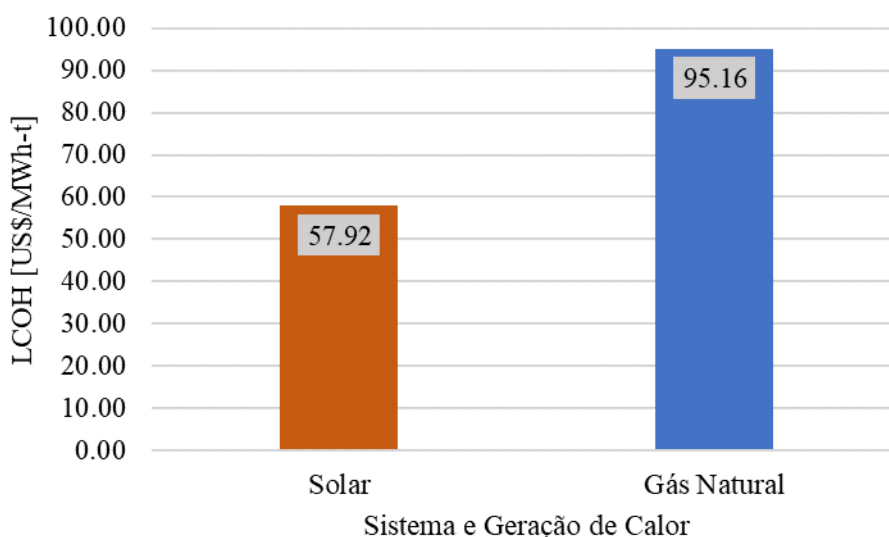


Figura 9 - Custo linearizado de calor (LCOH) para o sistema de geração de calor com energia solar térmica proposto e para gás natural. Fonte: Autor.

No gráfico acima pode-se ver claramente que os custos, em um período de quinze anos, com o sistema de geração de energia solar térmica são consideravelmente mais baixos que os com gás natural. Esta informação corrobora o que já era possível observar a partir da análise do gráfico do Valor Presente Líquido do sistema.

5. Conclusão

Com a tendência global de cada vez mais investimentos voltados à sustentabilidade, principalmente com a mudança da matriz energética, a indústria deve buscar soluções diferentes para ser capaz de suprir seus processos. O Brasil, devido às suas dimensões continentais e posição relativamente próxima à linha do Equador, tem um dos maiores potenciais mundiais para a utilização de sistemas de geração de calor a partir de energia solar térmica.

A partir da análise do estudo de caso proposto, evidencia-se que é possível, mesmo no Rio Grande do Sul, uma das regiões do país com menor incidência solar, gerar calor suficiente para ser aproveitado em processos industriais. A partir dos dados da simulação, conclui-se que, entre outubro e março, a energia solar pode compor parte significativa da matriz energética para geração de calor na aplicação analisada. Nos demais meses apesar de em menor escala, também existe uma economia não negligenciável no consumo de gás e, por conseguinte, na emissão de poluentes.

Em relação à avaliação financeira, os dados da simulação mostram que já é possível que sistemas de geração de calor de calha parabólica gerem economia suficiente para serem viáveis em um prazo de nove anos. Embora este período costuma ser grande demais para consideração de empresas da indústria, cabe ressaltar que, em países desenvolvidos, já existem leis de incentivo que aumentam consideravelmente a atratividade de instalações semelhantes e, com o tempo, projetos semelhantes devem ser propostos no Brasil. Também se viu que, em um período de 15 anos, os custos com energia solar, ainda que com um investimento considerável, é menor do que com sistemas a gás natural.

Como continuções da análise realizada neste trabalho, sugere-se como projetos futuros a realização de um estudo mais detalhado da integração do sistema de geração de calor simulado com o processo já em funcionamento na aplicação. Também se sugere a avaliação dos benefícios de se utilizar uma área total maior, capaz de abrigar mais conjuntos de coletores e gerar calor suficiente para a utilização em períodos onde não há disponibilidade de recurso solar.

6. Referências Bibliográficas

DUFFIE, JOHN A.; BECKMAN, WILLIAM A.; **Solar Engineering of Thermal Processes**, 4th edition, Wiley. Hoboken, Nova Jersey. 2013. 928p.

HAHN, PHILLIP; MESQUITA, MARCELO; PEREIRA, LUCIANO TORRES; KNAACK, JAN; BÄRBEL, EPP; **Energia Termossolar para a Indústria: Brasil**, São Paulo, Solar-Payback, 2018. Disponível em: www.solar-payback.com. Acessado em 15/08/21. 68p.

IRENA; **Solar Heat for Industrial Processes**, 40p., 2018, Disponível em: <https://www.irena.org/Publications>. Acessado em 12/07/21.

KALOGIROU, SOTERIS A.; **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**, 2nd edition, San Diego, CA. Elsevier, 2014. 815p.

LAUTERBACH, CHRISTOPHER; **Potential, system analysis and preliminary design of low-temperature solar process heat systems**, Kassel, Kassel University Press, 2014. 140p.

MADAENI, SEYED H; SIOSHANSI, RAMTEEN; DENHOLM, PAUL. **Capacity Value of Concentrating Solar Power Plants**, National Renewable Energy Laboratory, p. 12 – 25, 2011. Disponível em <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/51253.pdf>

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, 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>

SHARMA, ASHISH K; SHARMA, CHANDAN; MULLICK, SUBHASH C.; KANDPAL, TARA C. **Financial viability of solar industrial process heating and cost of carbon mitigation: A case of dairy industry in India**. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 27, p. 1-8, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.03.007> >

WAGNER, MICHAEL J.; GILMAN, PAUL; **Technical Manual for the SAM Physical Trough Model**, National Renewable Energy Laboratory, 114p., 2011 Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs>. Acessado em 02/08/21.

WEISS, WERNER; SPÖRK-DUR, MONIKA; **Solar Heat Worldwide**, Graz, Austria. 86p, 2020, Disponível em: <https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide>. Acessado em 21/07/2021.