

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR PARA LAVAGEM DE PEÇAS EM
UMA PLANTA DE PINTURA INDUSTRIAL

por

Júlia Tortelli Brzuska

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, outubro 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR PARA LAVAGEM DE PEÇAS EM UMA PLANTA DE
PINTURA INDUSTRIAL

por

Júlia Tortelli Brzuska

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Eng. Flávio Antônio Becon Lemos, Dr
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientadora: Prof^a. Eng. Letícia Jenisch Rodrigues, Dra.

Banca examinadora:

Prof. Eng. Cirilo Seppi Bresolin – DEMEC / UFRGS
Eng. Douglas Corrêa Rodrigues – TK Elevator
Prof. Eng. Francis H. R. França, Dr. – DEMEC / UFRGS

Porto Alegre, 05, outubro de 2022.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai e minha mãe pelo apoio nesses longos anos de faculdade, e por proporcionarem tudo para que eu pudesse continuar estudando.

À Gabriela e à Victória, por terem me acompanhado durante a graduação, tornando possível ter chegado até o fim.

Aos meus gatos, Momo e Yuki, por terem me acompanhado em todas as noites de estudos.

Ao Gregory, por sempre ser paciente e me escutar em todos os momentos, mesmo quando não compreendia o assunto, e sempre à espera de fins de semanas mais calmos.

A todos os professores ao longo da graduação, por terem disseminado seu conhecimento, e contribuído não apenas na minha, mas na formação de inúmeros profissionais.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a toda sociedade brasileira, por ter me proporcionado um ensino gratuito e de qualidade, apesar de todas as adversidades.

BRZUSKA, J.T. Sistema de aquecimento solar para lavagem de peças em uma planta de pintura industrial 2022. 17 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a análise da implementação de um sistema solar industrial (Solar Heat for Industrial Processes – SHIP) para aquecimento, para a lavagem de peças de um setor de pintura industrial localizada em Guaíba-RS. A indústria possui demanda diária de 1,5 m³ de água a 65°C utilizando um tanque de armazenamento de 6 m³. Propõem-se avaliar técnica e financeiramente a viabilidade do sistema utilizando coletores solares do tipo placa plana e do tipo tubo evacuado, avaliando a melhor topologia para o sistema, associando os coletores em série e paralelo. O sistema foi simulado para o software SAM (System Advisor Model). Para tecnologia de tubo evacuado conectar os coletores em paralelo apresentou os melhores resultados, já os coletores placa plana se beneficiaram ao serem associados em série. Conclui-se que 34,88 m² de coletores tubo evacuado são a melhor alternativa para atender a carga térmica da indústria de maneira satisfatória, com fração solar anual de 1 em janeiro e 0,55 em julho, com retorno financeiro no quinto ano.

PALAVRAS-CHAVE: Aquecimento Solar para Processos Industriais, Energia Solar Térmica, Software SAM, Aquecimento Solar de Água.

BRZUSKA, J.T **Solar heat system for pieces washing in industrial painting plant**. 2022. 17 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

This paper aims to evaluate the implementation of solar heat for an industrial process (SHIP) for heating water to wash parts in an industrial painting sector located in Guaíba – RS, Brazil. The industry requires a daily supply of 1,5 m³ of heated water at 65°C, using a storage tank of 6 m³. It is proposed to evaluate technically and financially the system using a flat plate and evacuated solar tube collectors, determining the best topology for the system, associating the collectors in series and parallel. The system was simulated using the software SAM (System Advisor Model). For the evacuated tube technology, connecting the collectors in parallel has presented the best results, while the flat plate collectors benefited from being associated in series. It is concluded that the best alternative to satisfactorily attending to the thermal load of the industry is the evacuated tube collectors with 34.88 m² of area. The monthly solar fraction in January is equal to 1, and in July, it is equivalent to 0.55. The financial return occurs in the fifth year.

KEYWORDS: Solar Heat for Industrial Process, Thermal Solar Energy, Software SAM, Water Solar Heating

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1	Recurso Solar	2
2.2	Coletores Solares	3
2.3	Análise Térmica do Coletor Solar	4
2.4	Tanque de Armazenamento	5
3	METODOLOGIA	5
3.1	Definição do Problema	5
3.2	Simulação do Sistema	6
3.3	Análise Financeira	7
3.4	Estudo de Caso	8
3.4.1	Especificação do Local	8
3.4.2	Parâmetros de Entrada	9
4	RESULTADOS	10
4.1	Análise Térmica	10
4.1.1	Coletor do Tipo Placa Plana	10
4.1.2	Coletor do Tipo Tubo Evacuado	12
4.2	Análise Financeira	14
5	CONCLUSÕES	16
	APÊNDICE A	19

1 INTRODUÇÃO

A crescente conscientização com mudanças climáticas fomenta a busca por alternativas energéticas renováveis para países e indústrias. Pela sua grande disponibilidade e possibilidade de aplicações em larga escala, a energia solar térmica surge como uma alternativa para atender a demanda térmica industrial, com diversas aplicações em baixa e média temperatura.

O Brasil apresentou crescimento de 7% no mercado da energia solar térmica em 2020 (WEISS et.al., 2021), porém as aplicações industriais ainda são incipientes no país. Entretanto, com alta nos preços de derivados de petróleo, como, por exemplo, o aumento de 37% no preço do GLP (gás liquefeito de petróleo) em um ano (ANP, 2022), o estudo da viabilidade de sistemas de aquecimento e pré-aquecimento solar industrial se torna mais atrativo.

Mundialmente, a principal aplicação de sistemas de aquecimento solar industrial (*Solar Heat for Industrial Processes – SHIP*) está focalizada na indústria alimentícia, especialmente na indústria de laticínios. ISMAIL; YUNUS e HASHIM, 2021 realizaram um levantamento das unidades operantes de sistemas de aquecimento solar industrial, no qual não constava nenhuma no Brasil. A falta de investimentos no cenário brasileiro, que apesar de muito favorável à energia solar térmica em comparação a países europeus com menor oferta de irradiação solar, está relacionada, segundo CARREIRA JUNIOR; SACOMANO e NETO, 2014, com a falta de conhecimento da tecnologia e profissionais na área.

Em um levantamento feito para indústrias alimentícias e têxtil em Portugal e Espanha, 60% das temperaturas de operação estão abaixo da faixa de 160°C, as quais são atingidas com facilidade por coletores solares. Porém, várias das aplicações que estão na faixa da tecnologia solar térmica podem ser atingidas pela melhoria da eficiência do processo, através de medidas de recuperação de calor (SHARMA et al., 2017). Os autores também levantaram que 70% das plantas industriais operam com coletores placa plana ou de tubo evacuado, e que 50-70% dos custos do SHIP estão relacionados com os coletores solares.

Uma análise comparativa entre coletores de tubo evacuado e de placa plana foi realizada por NIEMEZEWSKI DA ROSA, 2014. Apesar de serem significativamente mais caros que os coletores de placa plana, a tecnologia de tubo evacuado apresenta um bom desempenho para climas mais frios, dado seu grande isolamento térmico, e desempenho mais estável com a variação de radiação, sendo apenas mais atrativo para o clima da região Sul do Brasil.

LUGO et al., 2019 propuseram uma simulação no software TRNSYS (*Transient System Simulation Tool*) para estimar o desempenho de coletores de tubo evacuado para SHIP em climas quentes. A simulação foi validada experimentalmente. O objetivo foi avaliar o desempenho do sistema como um todo, considerando as perdas em armazenamento e canalizações. Os autores observaram que o sistema teve uma eficiência em torno do 60%, com as perdas em canalizações e armazenamento, somando até 30% das perdas totais. O estudo apresentou um *payback* de 51 meses.

O trabalho de MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ et al., 2022 ressaltou a importância do estudo aprofundado do processo industrial para o dimensionamento adequado do sistema térmico solar. O dimensionamento otimizado, com a integração de ciclos de recuperação de calor com o SHIP, pode levar ao atendimento total da carga térmica do processo, resultando na redução total de emissões de CO₂ e *payback* extremamente favoráveis ao investimento, com retorno de 1,7 anos para o caso de usina de bioetanol, e de 2 anos para uma planta de laticínios.

Um estudo da viabilidade econômica de SHIP para uma cervejaria em Porto Alegre – RS foi realizado por GEREMIA, 2018. De acordo com o autor, o *payback* variava conforme o regime operatório

da cervejaria, por conta da característica sazonal da disponibilidade solar. A otimização do horário de funcionamento da cervejaria resultava em *payback* distintos, 7,82 anos para operação às 16 horas, e 9,31 anos para operação às 10 horas.

No estudo realizado por UPPAL e KESARI, 2015, foram levantadas as aplicações de SHIP na indústria automobilística na Índia. Para esta situação, a maior demanda térmica da fabricação de automóveis está concentrada na pintura, com faixas de temperatura de 80°C a 180°C para ar quente. Para a implementação de um SHIP foram utilizados 292 m² coletores solares, resultando um *payback* de 1,3 anos. Já no segundo caso analisado - lavagem de rodas de automóveis - a demanda está concentrada em quatro tanques de água quente, com a temperatura máxima de 70°C. A instalação de 1.365 m² de coletores solares de tubo evacuado, para suprir a demanda, leva a um *payback* de 2 anos. Os *payback* levantados pelos autores sofreram influências de incentivo fiscal do governo indiano para redução de emissões na indústria.

Semelhante à indústria automobilística, a demanda térmica da indústria de elevadores está centralizada na zona de pintura e lavagem de peças. Com faixas de temperatura de ar abaixo de 200°C para estufas de secagem de peças, e na faixa de 70°C para a lavagem de peças. Temperaturas de grande potencial para o aquecimento solar. A instalação analisada possui duas zonas de secagem da tinta movidas a ar quente, operando a 180°C e 120°C, e uma zona de lavagem, com reservatório de água de 6 m³ quente na temperatura de 65°C, com demanda 1,5 m³ por dia. Ambos os complexos usam GLP como combustível.

Por conseguinte, este trabalho teve como objetivo dimensionar a área necessária para atender a demanda térmica para o processo de lavagem em uma área de pintura de peças de elevadores. A indústria está localizada em Guaíba-RS. Também foi analisado o impacto de diferentes configurações de coletores, associando-os em série e paralelo, para as tecnologias de coletores solares do tipo placa plana e tubo evacuado. O *software* SAM foi utilizado para simular a geração de energia do sistema. A partir dos dados simulados, foram calculados a viabilidade econômica do projeto e o custo nivelado de calor, LCOH (*levelized cost of heat*) para os dois tipos de coletores.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta Seção apresenta-se alguns conceitos fundamentais sobre a energia solar térmica, os quais são necessários para o desenvolvimento do trabalho.

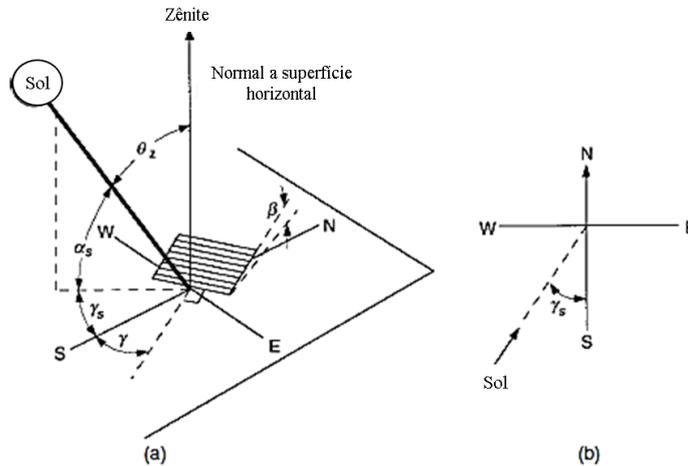
2.1 Recurso Solar

A radiação emitida pelo sol é dividida em dois componentes geométricos: a radiação direta, proveniente do disco solar, e a radiação difusa, oriunda da abóboda celeste. A irradiância total, G [W/m²], recebida por uma superfície, consiste na soma das componentes difusa e direta. À medida que a radiação solar adentra a atmosfera terrestre, ela sofre atenuações, que dependem da espessura da camada de ozônio, da distância percorrida até a superfície, e da composição atmosférica, quantidade de água, particulados etc.

Além disso, a radiação solar não é uniforme ao longo ano, e nem ao longo do dia. Devido à órbita elipsoide terrestre, a radiação varia fortemente de acordo com os ângulos solares, como o ângulo de azimute γ , o ângulo horário ω , e o ângulo de incidência θ , Figura 2.1. Para um melhor aproveitamento do sistema de aquecimento solar, devem ser considerada as variações da radiação em seu dimensionamento,

e o coletor deve ser posicionado em um ângulo adequado com a localização e a demanda, de forma a otimizar seu funcionamento.

Figura 2.1 - Ângulos solares sobre uma superfície.



FONTE: DUFFIE e BECKMAN, 2013.

A operação de um sistema de aquecimento solar é influenciada pelos níveis de radiação e pela temperatura ambiente. Esses dados são compilados em mapas solares, os quais apresentam valores médios de radiação solar, obtendo-se um panorama geral. Concomitantemente, arquivos climáticos apresentam um compilado de medições meteorológicas locais, as quais são lidas por softwares, proporcionando estimativas de aproveitamento do recurso solar para geração de calor.

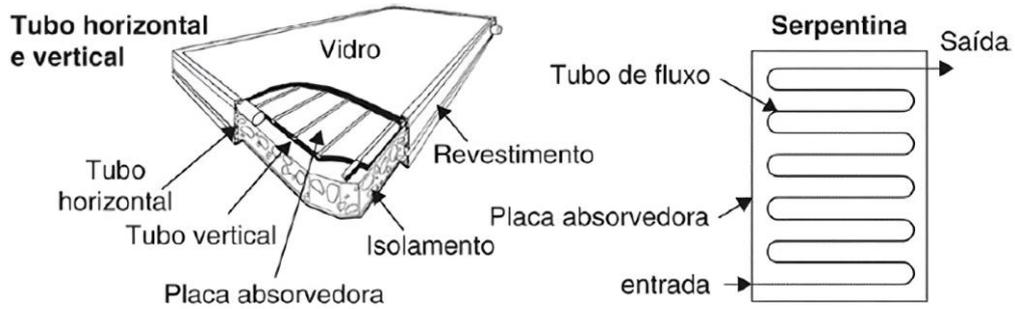
2.2 Coletores Solares

Coletores solares são dispositivos modulares que convertem a energia radiante providente do Sol em energia térmica para um fluido de trabalho, geralmente água, ar ou óleo. Por sua natureza modular, é incrementada a quantidade de coletores de acordo com a demanda.

Os coletores solares podem ser classificados como concentradores ou não concentradores. Coletores concentradores possuem uma grande superfície refletora que concentra a radiação solar em uma pequena superfície receptora, atingindo altos níveis de temperatura. Pelos seus aspectos construtivos, quase não absorvem radiação difusa, e necessitam de um sistema de rastreamento solar. Já coletores não concentradores operam com a radiação difusa e direta, atingindo temperaturas de até 100°C . Como o escopo deste trabalho é para temperaturas médias de até 70°C , foram considerados apenas coletores não concentradores.

Entre os coletores solares enclausurados, destacam-se o coletor de placa plana e o de tubo evacuado. O coletor placa plana apresenta uma construção simples e barata, formado por uma cobertura transparente, geralmente de vidro para diminuir as perdas por convecção, uma superfície aletada para remoção do fluido de calor, uma placa absorvedora, além de tubos para circulação do fluido de trabalho, e um revestimento para minimizar as perdas pelas laterais do coletor, Figura 2.2.

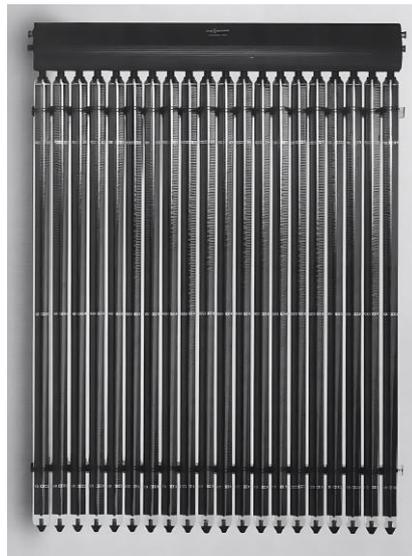
Figura 2.2 - Coletor solar do tipo placa plana.



Fonte: KALOGIROU, 2014.

Já o coletor de tubo evacuado, Figura 2.3, possui aspectos construtivos mais sofisticados. Ele é composto de dois tubos concêntricos de vidro, separados por uma camada de vácuo, a qual reduz as perdas por convecção e condução, e o fluido está envolto em uma superfície seletiva. Sua natureza cilíndrica e seus aspectos construtivos, tornam o coletor de tubo evacuado mais caro e com uma área total maior, para a mesma área coletora, quando comparados ao coletor de placa plana. Porém o alto isolamento provido pelo tubo a vácuo o torna mais confiável e menos susceptível às variações climáticas.

Figura 2.3 - Coletor solar de tubo evacuado.



FONTE: KALOGIROU, 2014.

2.3 Análise Térmica do Coletor Solar

O ganho de energia útil, q_u , em W, é a taxa de transferência de calor entregue para o fluido pelo coletor, dada por

$$q_u = \dot{m}C_p(T_0 - T_i) \quad (2.1)$$

na qual \dot{m} é a vazão mássica do fluido de trabalho, em kg/s, C_p o calor específico, em kJ/kgK, T_0 é a temperatura de saída do fluido e T_i é a temperatura de entrada do fluido, ambas em °C. Do ponto de vista do coletor, temos que o ganho de energia útil é

$$q_u = A_a F_R [G_t (\tau\alpha) - U_L (T_i - T_a)] \quad (2.2)$$

na qual A_a é a área absorvedora do coletor, em m^2 , F_R é o fator de remoção do calor, adimensional, $(\tau\alpha)$ é uma propriedade radiante, da combinação cobertura-absorvedor, adimensional, G_t é a irradiância no plano do coletor, em W/m^2 , U_L é o coeficiente global de transferência de calor, em W/m^2K , e T_a é a temperatura ambiente, em $^\circ C$. Os valores de $F_R(\tau\alpha)$ e $F_R U_L$ são obtidos por meio de testes de desempenho do coletor, e válidos somente para a vazão de teste do coletor. Geralmente, são encontrados em catálogos de fabricantes do coletor.

Já a eficiência do coletor, η , é definida por

$$\eta = \frac{q_u}{A_a G_t} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \left(\frac{T_i - T_a}{G_t} \right) \quad (2.3)$$

na qual os demais termos já foram apresentados anteriormente.

Define-se, para um sistema de aquecimento solar, a fração solar, que é fração da energia necessária no processo que é atendida pelo sistema térmico solar, f , dada pela equação a seguir,

$$f = \frac{L - L_{aux}}{L} \quad (2.4)$$

na qual L é a energia fornecida para o sistema, e L_{aux} é a energia de uma fonte auxiliar necessária para suprir a carga.

2.4 Tanque de Armazenamento

O tanque de armazenamento é um elemento indispensável para um sistema de aquecimento solar. Ele permite o melhor aproveitamento da energia solar, permitindo uso do calor absorvido pelos coletores em horários de menor incidência solar. O tanque de armazenamento deve ser feito de material isolante, e deve estar o mais perto possível dos coletores, para evitar perdas de calor na tubulação. A estratificação do tanque de armazenamento é a presença de gradientes de temperatura no mesmo, devido à retirada de água quente para uso, do topo do tanque, e à entrada de água fria do fundo do tanque, oriunda da rede. A estratificação melhora o desempenho do tanque, uma vez que a água mais quente está disponível para uso e água mais fria é fornecida para os coletores (KALOGIROU, 2014).

3 METODOLOGIA

Nesta Seção apresenta-se a metodologia aplicada, definindo-se as limitações e as ferramentas aplicadas para a simulação do caso de estudo.

3.1 Definição do Problema

O estudo teve como objetivo dimensionar a área de coletores necessária para atender à demanda térmica da lavagem, em uma área de pintura de peças de elevadores localizada em Guaíba-RS. Foi analisado o impacto de diferentes configurações de coletores, associando-os em série e paralelo, para as tecnologias de coletores solares do tipo placa plana e de tubo evacuado. Os dados referentes à posição geográfica, à inclinação do telhado e às distâncias entre o ponto de consumo e o campo solar, foram determinados de acordo com as condições reais da instalação.

Para simulação do sistema, foi empregado o software *System Adysor Model* – SAM, (NREL, 2022), versão 2021.12.2, o qual permite, entre outras coisas, a análise térmica e energética da geração de energia SHIP para cada hora do ano. A partir do software, obteve-se a economia mensal de combustível, permitindo assim, calcular o tempo de retorno do investimento, o VPL (valor presente líquido), a taxa interna de retorno, TIR, e o custo nivelado de calor, LCOH, para cada um dos sistemas propostos.

3.2 Simulação do Sistema

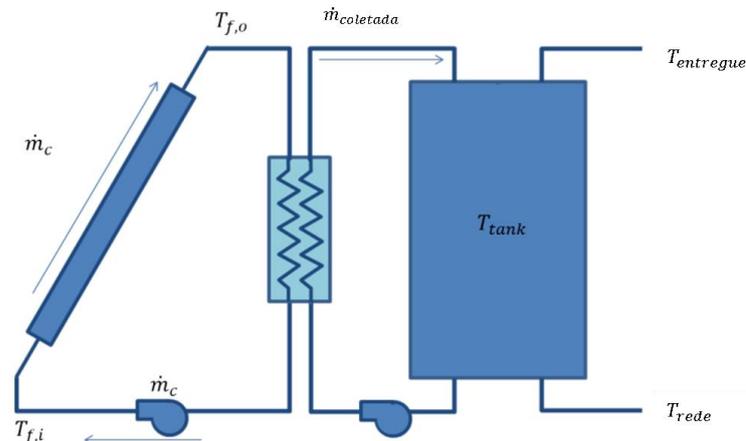
O SAM é um *software* gratuito desenvolvido pela NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) que permite a simulação de diversas fontes de energias renováveis - fotovoltaica, eólica, solar térmica, energia de marés e geotérmica - possibilitando a análise de desempenho e amplas projeções financeiras de sistemas de energias renováveis.

Os arquivos climáticos são importados para o SAM. Através desses, o software obtém as características climáticas do local, como temperatura de bulbo seco, irradiância, irradiação, precipitação etc. Com os dados climáticos, são configuradas as condições de contorno do sistema, e, então, o SAM simula a de geração de energia para todas as horas do ano.

Para o caso estudado, foram empregados os coletores solares do tipo placa plana e do tipo tubo evacuado para o aquecimento de água. Utilizou-se, então, a opção *Solar Water Heating* do SAM. Esta modalidade representa um sistema de um tanque de água, ou *glycol*, com um aquecedor elétrico como fonte de energia auxiliar. O software assume que o sistema de aquecimento solar utiliza energia do aquecedor para completar a totalidade da sua demanda térmica. Assim, a fonte de energia auxiliar nativa do *software* é um resistor elétrico. Desta forma, optou-se pela utilização de uma macro disponível no próprio SAM, a qual faz um balanço de energia para calcular a energia economizada pelos coletores com uma fonte auxiliar de energia a gás - situação do caso de estudo real.

As simulações utilizaram a formulação de sistema *quasi*-estacionário. Ou seja, os valores são assumidos constantes dentro de um intervalo de uma hora. O tanque de armazenamento assume três modos de operação. O modo 1 é o modo de inicialização, onde a energia está sendo coletada do sistema e o tanque está pouco estratificado. O modo 2 é o modo de temperatura uniforme do tanque. O modo 3 de operação do tanque é quando não há energia útil entregue ao taque, e o tanque está completamente estratificado. Nessa situação, ele é modelado em dois nós, um quente e um frio. Entre o tanque de armazenamento e os coletores solares há opção de definir a efetividade do trocador de calor, Figura 3.1. Neste trabalho a mesma foi definida como 1, pois não há utilização de trocador de calor.

Figura 3.1 - Modelo de aquecimento de água simplificado resolvido pelo SAM.



Fonte: NREL 2022.

O *software* permite editar um vetor com as demandas diárias em base horária de consumo. Uma vez que o consumo fornecido pela empresa é controlado apenas em base diária, foi assumido que o consumo é linear durante o horário de funcionamento da planta, das 8h às 17h. O sombreamento da edificação pôde ser parametrizado dentro do próprio SAM, por meio da ferramenta de cálculo de sombreamento 3D. Nessa ferramenta é possível modelar, de forma simplificada, a orientação da edificação e as principais fontes de sombreamento próximas. Já a perda de carga nas tubulações foi calculada seguindo as correlações apresentadas por DUFFIE e BECKMAN, 2013.

3.3 Análise Financeira

Para averiguar a viabilidade do sistema proposto, deve-se considerar sua capacidade de gerar retorno financeiro sobre o investimento, dado pela economia de combustível associada à operação do sistema. Define-se o período de *payback* como o tempo necessário para que o valor inicial do investimento seja igual ao valor do fluxo de caixa acumulado. Se não forem considerados juros durante o período tem-se o *payback* simples. Quando há uma taxa de juros aplicada ao fluxo de caixa, tem-se o *payback* descontado. Neste trabalho adotou-se o *payback* descontado para a análise financeira. (SHORT; PACKEY e HOLT, 1995).

O VPL traz ao presente o fluxo de caixa do futuro, corrigido através da taxa de juros. O ponto no tempo em que o VPL é zero corresponde ao período de *payback* descontado. Neste trabalho foi realizada uma análise em um período de 20 anos, considerando taxas de depreciação do equipamento, inflação e uma taxa de atratividade mínima. Calculou-se também a taxa interna de retorno, TIR, a taxa de juros que zera o VPL, ou seja, a maior taxa de juros que tornaria o projeto viável.

Outro parâmetro para analisar a viabilidade do projeto é o custo nivelado de calor, LCOH. Este permite contrastar alternativas tecnológicas em diferentes escalas de operação, com custos de investimentos diferentes. O LCOH serve para comparar, por exemplo, o custo de energia de uma fonte renovável com uma fonte fóssil convencional. Neste caso, a energia proveniente do SHIP e da queima de GLP. Para o cálculo do LCOH do sistema térmico solar, segundo SHC, 2018, utiliza-se

$$LCOH_{solar} = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^{t=20} \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{t=20} \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad [US\$/kWh_t] \quad (3.1)$$

na qual I_0 é o custo inicial, em $US\$/m^2$, C_t é a soma do custo de operação e manutenção do sistema, em $US\$/m^2$, E_t é a energia útil produzida pelo sistema, em kWh/m^2 , e r é a taxa de juros. Já o cálculo do LCOH, da fonte de energia fóssil, é dado por

$$LCOH_{fossil} = \frac{\sum_{t=1}^{t=20} \frac{(S_c + S_E \cdot \beta \cdot PCI)}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{t=20} \frac{\beta \cdot PCI}{(1+r)^t}} \quad [US\$/kWh_t] \quad (3.2)$$

na qual, S_c é o custo do combustível, em $US\$/kg$, S_E é a soma dos custos de operação e manutenção do sistema para combustíveis fósseis, em $US\$/kg$, β é a eficiência do queimador, adimensional, e PCI é o poder calorífico inferior do combustível, em kWh/kg . Uma vez que o queimador convencional a gás já está instalado, os investimentos iniciais no cálculo do $LCOH_{fossil}$ não foram computados, tão pouco foram atribuídos custos de manutenção.

3.4 Estudo de Caso

A seguir apresenta-se as características de operação da indústria e as considerações utilizadas para a realização do trabalho.

3.4.1 Especificação do Local

O sistema analisado apresenta certa simplicidade. O tanque de armazenamento de água quente é aquecido por um queimador a GLP. A água armazenada no tanque é dividida em tanques menores, onde é misturada com solvente de tinta, para a lavagem das peças pintadas. Os tanques menores não possuem queimadores, e água misturada com solvente não retorna ao tanque de armazenamento. Como não há retorno de água, ou queimadores, a jusante do reservatório, o SHIP tem como função manter apenas o tanque principal aquecido. Os dados do sistema são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3-1: Dados do sistema analisado.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Volume reservatório	6 m ³
Temperatura média do reservatório	65°C
Demanda diária	1,5 m ³ /dia

Fonte: AUTORA.

Salienta-se que o volume total do tanque é muito superior à demanda diária de água quente. O excesso de armazenamento requer um maior número de coletores para atingir a temperatura média do tanque. Recomenda-se um volume entre 40L e 80L, por área de coletor solar, para o tanque de armazenamento (KALOGIROU, 2014).

A edificação onde se encontra o sistema possui uma grande área de telhados disponível, Figura 3.2, não sendo este um limitante para a implementação dos coletores. Há apenas uma edificação à leste do

telhado, a qual acarreta perdas extras por sombreamento. Os dados da edificação são apresentados na Tabela 3-2.

Figura 3.2 - Área de telhado disponível.



Fonte: AUTORA.

Tabela 3-.2: Dados da edificação.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Área disponível	14.500 m ²
Altura do telhado	5,5 m
Inclinação do telhado	7°
Azimute do telhado	7°

Fonte: AUTORA.

3.4.2 Parâmetros de Entrada

Para a simulação do sistema, primeiramente é necessário definir as condições climáticas do local. Optou-se pelos dados disponíveis no diretório do CLIMATE ONEBUILDING, 2022, que possui um acervo de dados climáticos de várias localidades do mundo. Por ausência de arquivos específicos de Guaíba, foram adotados os dados referentes à estação meteorológica do Aeroporto Salgado Filho em Porto Alegre – RS, cerca de 30 km do local da indústria. Os dados são referentes aos anos de 2004 a 2018 importados em forma de um ano médio em base horária para o *software*.

Foi estipulada a temperatura máxima do tanque em 80°C. Uma vez que o tanque ultrapassa o valor máximo, o SAM define a temperatura para o valor máximo definido, uma representação simplificada da abertura da válvula de escape do sistema. Foi definido um consumo de água quente de 160,1 kg/h, durante as 9h de operação da indústria, 20°C para a temperatura da sala, na qual se encontra o tanque solar, e uma bomba de 3 CV (2,2kW). A definição da bomba seguiu a metodologia do catálogo do fabricante SCHNEIDER, 2008. Inicialmente, procurou-se coletores solares vendidos no Brasil e avaliados pelo Inmetro. Porém, dada a metodologia de testagem do órgão, os coeficientes de despenho do coletor não são os mesmos adotados pelo *software*. Sendo assim, procurando marcas que atuassem no mercado, foram selecionados dois coletores do banco de dados do SAM, um do tipo placa plana e um do tipo tubo evacuado. As especificações dos coletores estão na Tabela 3.3.

Tabela 3-.3 – Dados Coletores Solares

<i>Coletor</i>	<i>Tipo</i>	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	<i>Área m²</i>	<i>Preço US\$</i>
Jiangsu SR210	Placa plana	0,662	3,82	2,41	200,00
Jiangsu TZ58-188-25R	Tubo evacuado	0,398	0,62	4,36	700,00

Fonte: (JIANSU SUNRAIN SOLAR ENERGY, 2022).

Na análise financeira é necessária a determinação dos fatores econômicos do sistema. O cálculo dos investimentos necessários foi realizado utilizando-se um sistema de exemplo, proposto pela SHC, 2018, e os valores dos coletores selecionados. Uma vez que a indústria já possui um tanque com isolamento térmico, equipado com sensores de controle de temperatura para atuação do queimador, negligenciou-se o investimento necessário para aquisição de um tanque solar. Para os custos anuais de manutenção do campo solar, considerou-se o valor de 3,00 US\$/m³ (SHARMA *et al.*, 2018), como custos de operação temos a energia elétrica gasta pela bomba que fornece água aos coletores. E, finalmente, os custos atribuídos para as fontes de energia auxiliar foram de 8,64 R\$/kg de GLP e de 0,24 R\$/kWh de eletricidade, valores pagos em agosto de 2022 pela indústria.

4 RESULTADOS

Nesta seção apresenta-se os resultados obtidos a partir das simulações do SAM para o caso apresentado na seção anterior. Foram simulados diversos arranjos de coletores, associando-os em série e paralelo. Adotou-se a nomenclatura série x paralelo, ou seja, o arranjo 4 x 3 possui 4 coletores em série e 3 em paralelo.

4.1 Análise Térmica

Os resultados foram divididos em duas seções, a análise térmica, voltada para geração de energia e temperatura do tanque, e a avaliação financeira, aferindo o tempo de retorno do investimento.

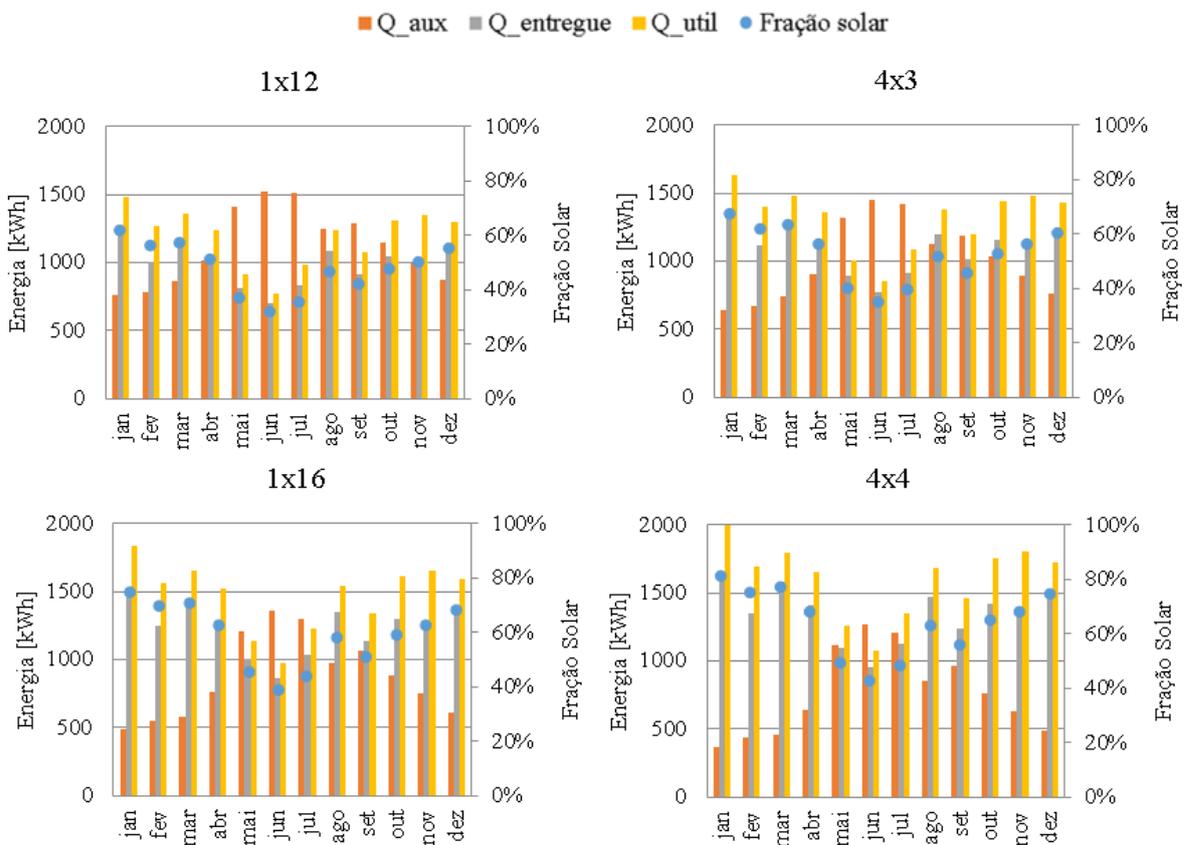
4.1.1 Coletor do Tipo Placa Plana

Primeiramente, o problema foi simulado com um coletor solar do tipo placa plana. Foram realizadas simulações com 12 coletores, nos arranjos 1 x 12 e 4 x 3, totalizando uma área de 28,92 m², e com 16 coletores, nas configurações 1 x 12 e 4 x 4, com uma área de 38,56 m². Utilizou-se os coletores em série para se atingir maiores temperaturas, e em paralelo para atender o volume. Ao associar o coletor em série, porém, o desempenho que os coletores adjacentes na série possuem é inferior (DUFFIE; BECKMAN, 2013). Para o coletor placa plana, devido a sua menor eficiência, os arranjos em série possibilitaram uma temperatura de saída da água maior, diminuindo a necessidade do uso de energia auxiliar. Entretanto, ao simular o sistema com mais coletores em série, no arranjo 6 x 2, por exemplo, nota-se a perda de desempenho do coletor. Devido a uma limitação do software não foi possível testar o efeito da diminuição da vazão para valores abaixo da vazão de teste do coletor.

Adotou-se a nomenclatura de Q_{aux} para a energia auxiliar necessária no sistema, $Q_{entregue}$ à energia entregue ao tanque, sendo essa a energia térmica entregue ao tanque pelos coletores em relação a temperatura da água da rede, e $Q_{útil}$ o ganho de energia útil dos coletores solares. Observa-se, na Figura

4.1, que o maior ganho de energia útil ocorre em janeiro, em todas as simulações. Nota-se, também, uma queda de desempenho em fevereiro, em relação a março, evento decorrente do sombreamento nos coletores, o qual é mais expressivo nos meses de fevereiro e outubro. No arranjo 1 x 12 a maior fração solar é 0,62, e na organização em 4 x 3 é de 0,68. O mês de julho registra fração solar de 0,35 e 0,43, respectivamente. Já com o aumento da área, obtém-se fração solar de 0,75 e 0,81 em janeiro, nos arranjos 1 x 16 e 4 x 4, respectivamente. Porém, nos meses de inverno, o sistema de 16 coletores não provê mais da metade da energia necessária, registrando fração solar mínima de 0,39 no arranjo 1 x 16, em contrapartida a 0,45 no arranjo 4 x 4.

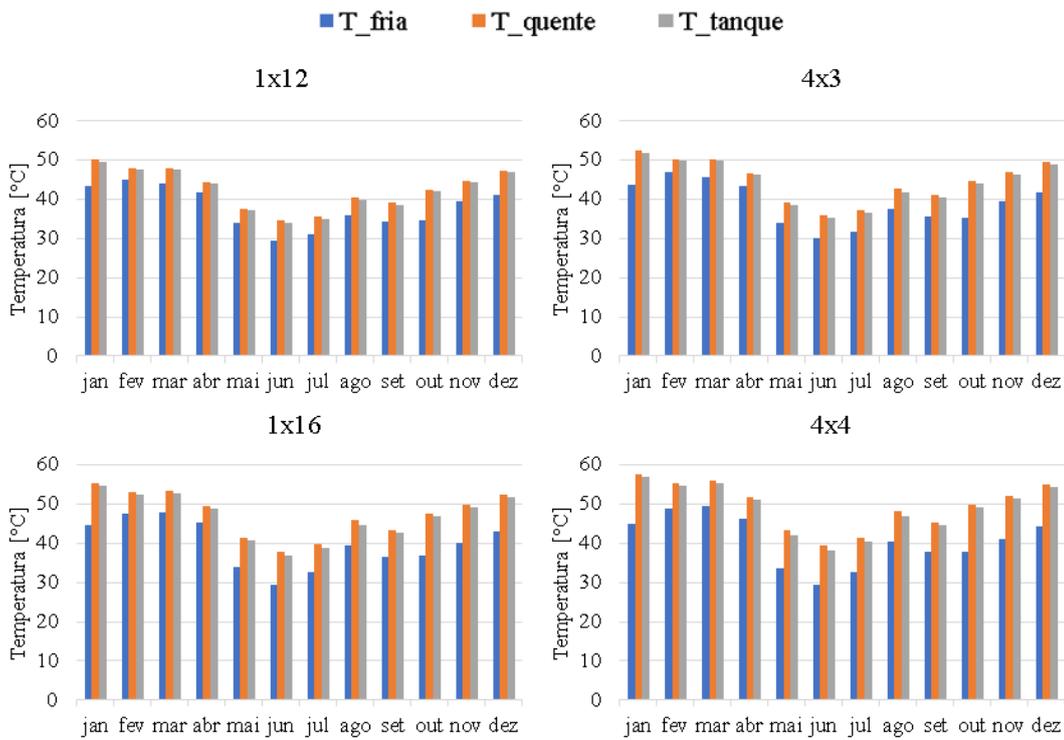
Figura 4.1 - Energia auxiliar, ganho de energia útil, energia entregue ao tanque e fração solar do coletor placa plana para os arranjos 1 x 12, 4 x 3, 1 x 16 e 4 x 4.



Fonte: AUTORA.

O perfil de temperaturas mensal segue o mesmo comportamento do ganho de energia do sistema, Figura 4.2. Define-se T_{fria} como a temperatura da parte inferior do tanque e T_{quente} como a temperatura da parte superior do tanque, onde é retirada a água para o uso. A T_{tanque} é a temperatura média do tanque.

Figura 4.2 - Temperatura da parte inferior, superior e média do tanque para o coletor placa plana para os arranjos 1x12, 4x3, 1x16 e 4x4.



Fonte: AUTORA.

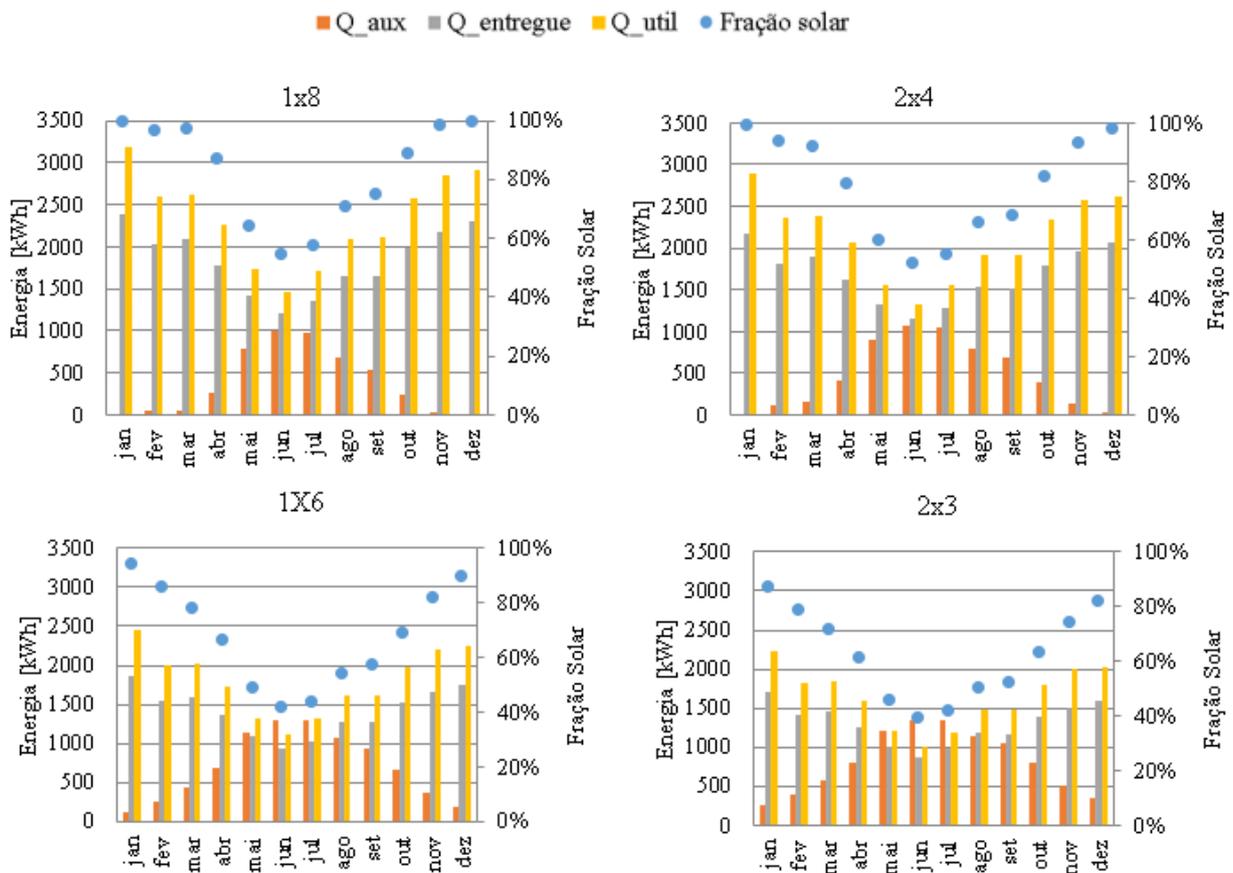
Nos arranjos de 12 coletores, em nenhum mês a temperatura do reservatório foi igual a temperatura de uso da água, 65°C , conforme pode ser visto na Figura 4.2. No mês de janeiro, a temperatura do reservatório foi $49,6^{\circ}\text{C}$ e $51,71^{\circ}\text{C}$ nos arranjos 1 x 12 e 3 x 4, respectivamente. No mês de junho a temperatura do reservatório foi de $33,89^{\circ}\text{C}$ e $35,26^{\circ}\text{C}$. Devido ao baixo volume de água fria no tanque, as temperaturas da parte superior do tanque se assemelham muito com a temperatura média do tanque, as quais resultaram em $50,0^{\circ}\text{C}$ e $52,31^{\circ}\text{C}$ em janeiro e $34,5^{\circ}\text{C}$ e $35,93^{\circ}\text{C}$ no mês junho. Nas simulações com 16 coletores, a temperatura média do tanque também não atingiu a temperatura de consumo, alcançando valores mais próximos em janeiro, de $54,61^{\circ}\text{C}$ na configuração 1 x 16, e de $56,83^{\circ}\text{C}$ na 4 x 3. Já nos meses de invernos, a temperatura média do tanque para os arranjos foi de $36,91^{\circ}\text{C}$ e $38,30^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

4.1.2 Coletor do Tipo Tubo Evacuado

O coletor escolhido, do tipo tubo evacuado, apresenta uma área maior em relação ao coletor tipo placa plana. Utilizando 8 coletores, obtém-se uma área de $34,88\text{ m}^2$ e com 6 coletores $26,16\text{ m}^2$. Cogitou-se utilizar 9 coletores, com uma área total de $39,24\text{ m}^2$, área semelhante a utilizada pelos coletores placa plana. Porém, essa configuração há muito desperdício de energia nos meses de maior incidência solar, a qual acarretava uma temperatura do tanque superior a 75°C , implicando o sobredimensionamento do sistema. Foram simuladas as organizações de 1 x 8 e 2 x 4 para 8 coletores, e de 1 x 6 e 2 x 3 para 6 coletores. Diferente do coletor placa plana, o coletor tubo evacuado não se beneficiou ao ser conectado em série, diminuindo a eficiência do sistema, quando comparados aos arranjos puramente em paralelo.

Como observado na Figura 4.3, com a utilização de 8 coletores tubo evacuado em paralelo, 1 x 8, obtém-se fração solar de 1 em janeiro e dezembro, e de 0,99 em novembro, e nos meses de inverno o sistema consegue suprir mais de 50% da energia necessária, sendo a fração solar mínima de 0,55 no mês de julho. Associando os coletores em paralelo na configuração 2 x 4, obtém a fração solar de 1 no mês de janeiro apenas, e de 0,99 em dezembro, com seu valor mínimo de 0,52 em julho. Utilizando 6 coletores, a fração solar máxima e mínima nos arranjos 1 x 6 e 2 x 3 é de 0,94 e de 0,87, e de 0,42 e de 0,40 respectivamente.

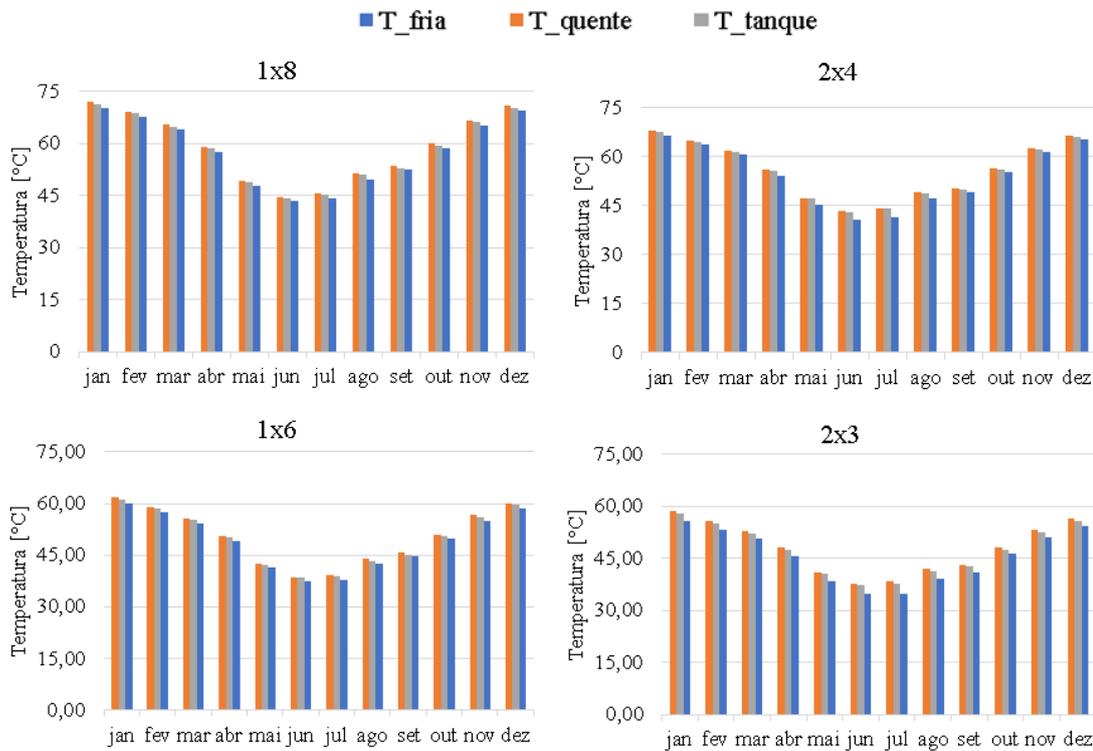
Figura 4.3 - Energia auxiliar, ganho de energia útil, energia entregue ao tanque e fração solar do coletor tubo evacuado para os arranjos 1x8, 2x4, 1x6 e 2x3.



Fonte: AUTORA.

Pela Figura 4.4 nota-se que a temperatura do tanque no arranjo 1 x 8 foi superior a temperatura de uso nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro, com seu máximo em de 71°C em janeiro, e mínimo de 44°C em julho. Como esperado a organização dos coletores no arranjo 2 x 4 resultou em temperaturas inferiores, com temperatura do tanque superior ou igual à de consumo apenas em janeiro e dezembro, com temperaturas de 67°C e 65°C respectivamente. Em nenhum, entretanto, superou-se a temperatura máxima estipulada de 80°C. Como previsto, as simulações com a área reduzida de 6 coletores não apresentaram nenhum mês com temperatura do tanque superior à temperatura de consumo.

Figura 4.4 - Temperatura da parte inferior, superior e média do tanque para o coletor tubo evacuado para os arranjos 1 x 8, 2 x 4, 1 x 6 e 2 x 3.



Fonte: AUTORA.

4.2 Análise Financeira

Para o sistema de aquecimento solar ser viável para a empresa, é imprescindível que a economia de combustíveis seja suficiente para garantir o retorno financeiro. Aplicando a metodologia anteriormente apresentada para o cálculo do valor presente líquido, os valores estimados para o investimento necessário do sistema são apresentados na Tabela 4.1. A composição do valor está apresentada no Apêndice A.

Tabela 4-1 – Investimento do sistema.

<i>Sistema</i>	<i>Valor US\$</i>
Placa plana 12 coletores	15.900,00
Placa plana 16 coletores	16.700,00
Tubo evacuado 8 coletores	19.100,00
Tubo evacuado 6 coletores	17.700,00

Fonte: AUTORA.

Tendo em vista o período de instabilidade econômica no Brasil, os valores da taxa de atratividade, inflação e reajuste anual do preço do combustível foram estimados em valores médios, levando em conta dados de um histórico de 10 anos (BANCO CENTRAL, 2022). A taxa de inflação utilizada foi de 10% a.a, o reajuste anual do preço do combustível foi de 9% a.a, e a taxa de atratividade mínima de 9,13%. Já

a degradação do sistema considerada foi de 1% a.a. Os resultados do valor presente líquido e TIR em um panorama de 20 anos, dos coletores placa plana e tubo evacuado nos arranjos testados, estão compilados na Tabela 4.2. Os gráficos referentes ao VPL de cada um dos arranjos estão apresentados no Apêndice A.

Tabela 4-2 – VPL e TIR do sistema para os arranjos testados.

<i>Arranjo</i>	<i>VPL (20 anos)</i>	<i>TIR</i>
Placa plana 1x12	US\$ 70.490,60	18,71%
Placa plana 4x3	US\$ 89.413,13	20,99%
Placa plana 1x16	US\$ 105.303,17	22,27%
Placa plana 4x4	US\$ 125.455,44	24,51%
Tubo evacuado 1x8	US\$155.526,88	25,67%
Tubo evacuado 2x4	US\$139.062,84	24,08%
Tubo evacuado 1x6	US\$144.454,20	22,57%
Tubo evacuado 2x3	US\$94.691,48	20,47%

Fonte: AUTORA.

Pode ser observado na Tabela 4.2 que o investimento superior, em um número maior de coletores, é mais vantajoso em um panorama de longo prazo. Devido ao reajuste no preço dos combustíveis, o investimento em coletores de tubo evacuado é mais atrativo, uma vez que entregam mais energia ao sistema, com menores dependências da fonte de energia auxiliar. Salienta-se, entretanto, que o como o investimento inicial do coletor placa plana é menor, obtém-se retornos semelhantes na configuração 4 x 4, e superiores utilizando o arranjo 2 x 3 do coletor tubo evacuado. Como esperado, para o coletor tubo evacuado, a associação dos coletores em série diminui o ganho de energia útil do sistema, resultado espelhado na análise financeira, ressaltando a importância do estudo do arranjo mais adequado para instalação do SHIP.

Para os arranjos testados, o VPL se tornou positivo no ano 6, apenas no arranjo de coletores placa plana 4 x 4. Nas demais configurações, obteve-se o primeiro valor positivo no sétimo ano. Em contrapartida, o sistema utilizando tubo evacuado atingiu o VPL positivo no ano 5 para todos os arranjos, exceto o 2 x 3, o qual obteve o retorno no sexto ano.

A utilização da análise do custo nivelado de calor, LCOH, permitiu uma comparação direta entre a fonte de energia solar térmica e o GLP. A Figura 4.5 apresenta a comparação entre os coletores solares testados e a fonte de energia convencional.

Figura 4.5 – Custo nivelado de calor (LCOH) para o sistema de aquecimento solar térmica e GLP.



Fonte: AUTORA.

Como visto no resultado do VPL, o custo da energia fóssil dentro do período de 20 anos é maior do que o custo do sistema solar térmico, principalmente quando empregado o coletor do tipo tubo evacuado. Tanto na análise térmica, quanto financeira, há melhora de desempenho para a mesma área de coletores solares em diferentes arranjos de coletores, evidenciando a importância do estudo de otimização do sistema de aquecimento solar.

5 CONCLUSÕES

Com a alta dos preços dos combustíveis fósseis, alinhados com a instabilidade econômica e a crescente busca por fontes de energias renováveis, a energia solar térmica aplicada em processos industriais é atrativa para empresas. Apesar da grande incidência solar no Brasil, em comparação a países europeus, o país ainda é incipiente na aplicação dessa tecnologia em sua indústria. Este trabalho propôs analisar a viabilidade da aplicação de um sistema de aquecimento de água solar para a lavagem de peças em uma indústria no Rio Grande do Sul, utilizando coletores do tipo placa plana e tubo evacuado.

Utilizando o *software* SAM, explorou-se diversas configurações de coletores solares, visando o maior uso da energia solar para dois tipos de coletores solares. Averiguou-se que para o coletor do tipo tubo evacuado, que conecta os coletores apenas em paralelo otimizou a energia útil do sistema. Em contrapartida, o coletor placa plana se beneficia da conexão em série, uma vez que apresenta um desempenho individual menor. A melhoria da eficiência do sistema para a mesma área, em relação a configuração dos coletores, salienta a importância do estudo do arranjo ideal para suprir a demanda do sistema. Os coletores tubo evacuado apresentaram resultados melhores, atingindo valores de fração solar unitária nos meses de verão, para uma área inferior quando comparados ao coletor de placa plana, atendendo, assim, melhor a necessidade da indústria.

Financeiramente, o sistema de aquecimento solar se mostrou viável em todas as configurações testadas em um panorama de 20 anos. O aumento da área do sistema trouxe melhores resultados econômicos, mostrando que a maior economia de combustível compensa o investimento superior. Em função do seu maior aproveitamento de energia solar, o coletor tubo evacuado se mostrou mais atrativo financeiramente, sendo o melhor investimento no arranjo de 34,88 m², com todos os coletores conectados em paralelo. De maneira geral, obteve-se o retorno do investimento no quinto ano para os coletores tubo evacuado e no sétimo ano para os coletores placa plana. Apesar de ser um tempo de retorno relativamente longo, não foram considerados quaisquer tipos de subsídios governamentais para o sistema, os quais elevariam sua atratividade.

Para trabalhos futuros, sugere-se um estudo mais detalhado da otimização do sistema em relação à vazão do coletor, além da análise da capacidade de armazenamento ideal para atender à demanda diária da indústria com energia solar térmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANP. **Precos de combustíveis e derivados do petróleo**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://tinyurl.com/yajwdyzp>. Acesso em: 10 mar. 2022.
- BANCO CENTRAL. **Séries históricas**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/sgpsub/localizarseries/localizarSeries.do?method=prepararTelaLocalizarSeries>. Acesso em: 19 set. 2022.
- CARREIRA JUNIOR, E. F.; SACOMANO, J. B.; NETO, M. M. **Energia solar térmica: inovação em aquecimento de água para processos industriais** Brazilian Journal of Biosystems Engineering v. [S. l.: s. n.], 2014.
- CLIMATE.ONEBUILDING. **Climate One Building**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://climate.onebuilding.org>. Acesso em: 22 abr. 2022.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 4th. ed. New Jersey: Wiley, 2013a.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 4th. ed. New Jersey: Wiley, 2013b.
- GEREMIA, A. da R. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL TÉCNICO E ECONÔMICO DE UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA EM UMA CERVEJARIA**. [s. l.], 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/193203>. Acesso em: 8 mar. 2022.
- ISMAIL, M. I.; YUNUS, N. A.; HASHIM, H. Integration of solar heating systems for low-temperature heat demand in food processing industry – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 147, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121004809?via%3Dihub>. Acesso em: 10 mar. 2022.
- JIANSU SUNRAIN SOLAR ENERGY, L. **Jiansu Sunrain Solar Energy**. [S. l.], 2022. Disponível em: https://lygtyy.en.alibaba.com/pt_PT/productgroup/210151391/coletor_solar.html?spm=a2700.shop_cp.88.18. Acesso em: 18 ago. 2022.
- KALOGIROU, S. **Engenharia de Energia Solar Processos e Sistemas**. [S. l.: s. n.], 2014a. *E-book*. Disponível em: www.loope.com.br.
- LUGO, S. *et al.* Numerical simulation and experimental validation of an evacuated solar collector heating system with gas boiler backup for industrial process heating in warm climates. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 139, p. 1120–1132, 2019.
- MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ, G. *et al.* Comprehensive solar thermal integration for industrial processes. **Energy**, [s. l.], v. 239, 2022.
- NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **System Advisor Model (SAM)**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://sam.nrel.gov>. Acesso em: 22 abr. 2022.
- NIEMEZEWSKI DA ROSA, F. **Aplicabilidade de coletores solares com tubo evacuado no Brasil**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UFRGS, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/62073>. Acesso em: 10 mar. 2022.
- SCHNEIDER. **Tabela para Seleção de Bombas e Motobombas**. [S. l.: s. n.], 2008. Disponível em: www.schneider.ind.br.
- SHARMA, A. K. *et al.* Financial viability of solar industrial process heating and cost of carbon mitigation: A case of dairy industry in India. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [s. l.], v. 27, p. 1–8, 2018.

SHARMA, A. K. *et al.* Solar industrial process heating: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 78, p. 124–137, 2017.

SHC. **Price Reduction of Solar Thermal Systems**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://task54.iea-shc.org>. Acesso em: 5 jul. 2022.

SHORT, W.; PACKY, D. J.; HOLT, T. **A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies**. [S. l.: s. n.], 1995. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/5173.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2022.

UPPAL, A.; KESARI, J. P. **Solar Industrial Process Heat in Indian Automobile Industry**. [S. l.: s. n.], 2015. Disponível em: <https://tinyurl.com/ya74hsnt>. Acesso em: 10 mar. 2022.

WEISS, W.; SPÖRK-DÜR, M. **Solar Heat Worldwide Detailed Market Data 2019 2 0 2 1 E D I T I O N Global Market Development and Trends in 2020**. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide>. Acesso em: 10 mar. 2022.

Para estimar o custo do sistema foi considerado um valor fixo de investimos, totalizando US\$ 14.700,00, para os custos de manutenção anuais, foi considerado 3,00 US\$/m², conforme sugerido por SHARMA *et al.*, 2018. Os valores foram obtidos com base de um sistema de referência disponibilizado pela SHC, 2018.

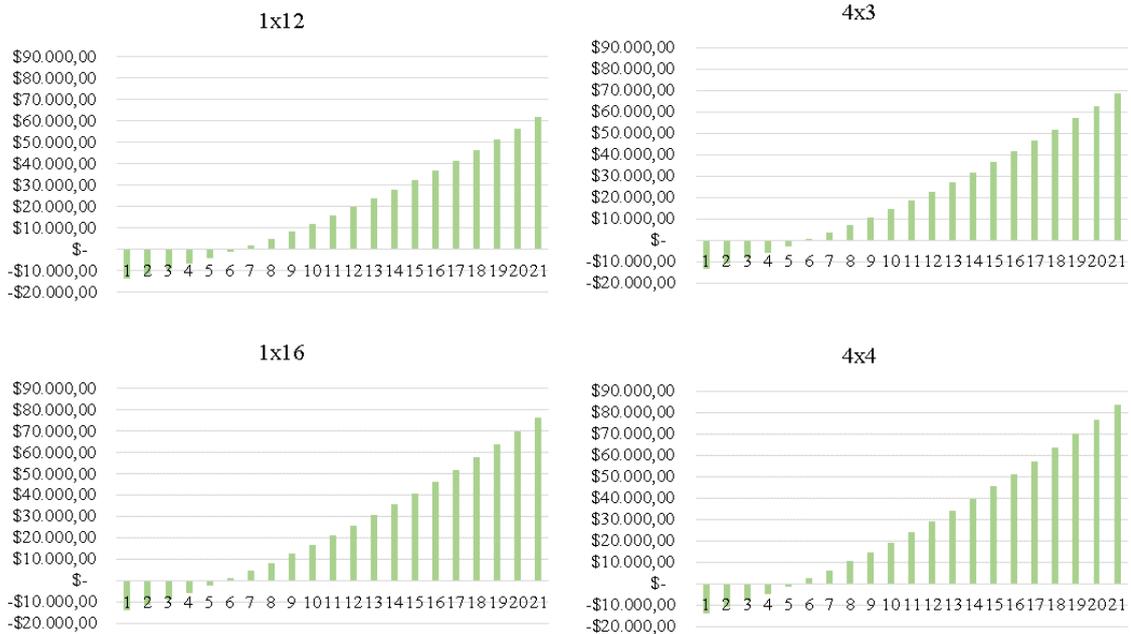
Tabela A-1: Custo fixo do SHIP.

<i>Componentes</i>	<i>Valor US\$</i>
Controle Térmico	1500,00
Componentes hidráulicos	4500,00
Instalação	8700,00
Total	14.700,00

Fonte: Adaptado de SHC, 2018.

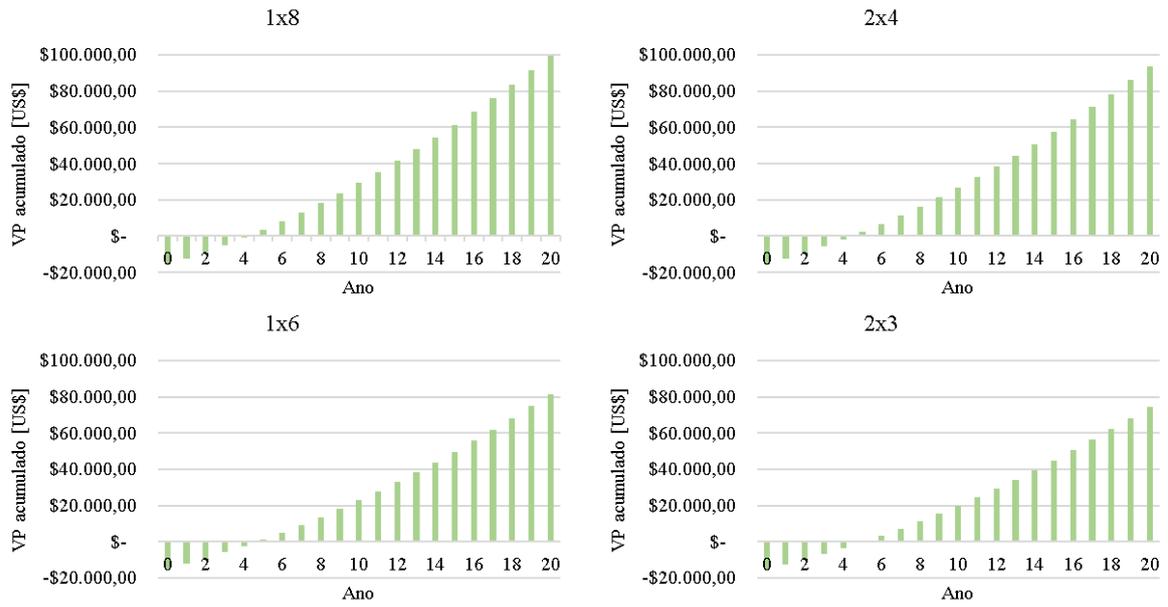
A seguir são apresentados os VPL para os arranjos simulados.

Figura A.1 – VPL dos arranjos para o coletor placa plana.



Fonte: AUTORA.

Figura A.2 - VPL dos arranjos para o coletor tubo evacuado.



Fonte: AUTORA.