



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

- Mestrado – Doutorado

ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM SISTEMA INDUSTRIAL DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA

por

Rafaela Ramos Barbosa

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção
do grau de Mestre.*

João Pessoa – Paraíba

dezembro, 2020

RAFAELA RAMOS BARBOSA

**ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM SISTEMA
INDUSTRIAL DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Orientadora: Professora Monica Carvalho, PhD.

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

B238a Barbosa, Rafaela Ramos.

Análise econômica e ambiental de um sistema industrial
de aquecimento solar de água / Rafaela Ramos Barbosa. -
João Pessoa, 2021.

67 f. : il.

Orientação: Monica Carvalho.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Energia Solar. 2. Calor. 3. Indústria. I. Carvalho,
Monica. II. Título.

UFPB/BC

CDU 551.521.37(043)

ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM SISTEMA INDUSTRIAL DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA

por

RAFAELA RAMOS BARBOSA

Dissertação aprovada em 14 de dezembro de 2020



Profa. Dra. MONICA CARVALHO

Orientadora – UFPB



Profa. Dra. KELLY CRISTIANE GOMES DA SILVA

Examinadora Interna – UFPB



Prof. Dr. DIMAS JOSE RUA OROZCO

Examinador Externo – UFLA

DEDICATÓRIA

Com gratidão, dedico este trabalho a Deus. Devo a Ele tudo o que sou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado força para superar todas as dificuldades que surgiram durante o desenvolvimento deste trabalho. A Nossa Senhora, por sempre me guiar e ser meu maior exemplo de fé e perseverança.

Aos meus pais, Alaíde Ramos e Israel Barbosa, e a minha irmã Israela Ramos, pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos, por sempre acreditarem e esperarem o melhor de mim.

Ao meu noivo, Emerson Cavalcante, por todo apoio e incentivo na realização dos meus sonhos, por sempre estar ao meu lado mesmo quando minhas escolhas nos separaram fisicamente.

A minha orientadora, professora Monica Carvalho, minha gratidão, pela orientação neste trabalho, mas também por toda compreensão, apoio e incentivo, por ser exemplo e inspiração.

Ao professor Rogério Kluppel, pela disponibilidade em ajudar no desenvolvimento deste trabalho e pelo incentivo contínuo.

As professoras, Kelly Gomes, Flávia Medeiros, Cristiane Kelly e Danielle Guedes, pelo incentivo e amizade durante esta caminhada.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica por todo conhecimento compartilhado.

A CAPES, pelo apoio financeiro durante a vigência deste curso.

A todos que contribuíram de alguma forma para a conclusão deste trabalho, meu muito obrigada!

ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM SISTEMA INDUSTRIAL DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA

RESUMO

O Brasil é um país privilegiado quando se trata do potencial de exploração de energias renováveis, com destaque para o potencial solar da região nordeste. Porém, ainda é pequena a expressividade da energia solar na matriz energética brasileira. Uma das formas mais disseminadas da energia solar é a sua utilização para aquecimento de água doméstica a partir do uso de coletores solares planos. Existe clara necessidade de diversificação da matriz energética nacional, da racionalização do uso da eletricidade, e da busca de eficiência energéticas nos vários setores de atividade. Reconhecendo o alto consumo energético do setor industrial para geração de calor de processo, o objetivo desta dissertação é desenvolver análises econômicas e ambientais para um sistema de aquecimento solar proposto para uma indústria têxtil localizada em João Pessoa, Paraíba. A análise econômica utiliza os parâmetros de tempo do retorno do investimento, taxa interna de retorno e valor presente líquido. A análise ambiental utiliza a metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida para quantificar os potenciais impactos ambientais associados ao sistema de aquecimento solar, e verifica o potencial de mitigação de mudanças climáticas em comparação a um sistema tradicional a gás natural. A análise econômica confirma que o sistema de aquecimento solar de água é viável, apresentando taxa de lucratividade de 29,46, o que o torna um investimento atrativo. A análise ambiental confirma a sustentabilidade associada a exploração da energia solar térmica, pois a não utilização de combustíveis fósseis contribui significativamente, retornando emissões de carbono 194% mais baixas que um sistema tradicional. A realização de análises diferentes, sob perspectivas diferentes e considerando-se aspectos diferentes, proporciona uma visão global do sistema de aquecimento solar proposto, reafirmando o interesse de sua instalação e seus benefícios associados.

Palavras chaves – Energia solar, calor, indústria.

ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA PARA PRODUÇÃO DE CALOR EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

ABSTRACT

Brazil is privileged regarding its potential for renewable energy exploitation, especially when considering the solar potential of the Northeast region. However, the contribution of solar energy to the Brazilian energy matrix is still incipient. One of the most common uses of solar energy is the production of sanitary hot water in flat plate collectors. There is a clear need to diversify the national energy matrix, promote the rational consumption of electricity, and introduce energy efficiency schemes in different activity sectors. Recognizing the high energy demands of the industrial sector regarding process heat, the objective of this dissertation is to develop economic and environmental analyses for a solar heating system, proposed for a textile industry located in João Pessoa (Northeast Brazil). The economic analysis employs the payback time, internal rate of return, and present net value. The environmental analysis applies the Life Cycle Assessment methodology to quantify the carbon emissions associated with the solar system, and compares these with a traditional gas-fueled system. The economic analysis confirms the viability of the solar water heating system, with a profitability rate of 29.46 that makes it an attractive investment. The environmental analysis confirms the sustainability associated with the exploitation of solar thermal energy, as the non-utilization of fossil fuels contributes to lower the carbon emissions, which were 194% lower than the traditional system. The development of different analyses provides a global perspective of the proposed solar heating system, and confirms the viability and benefits associated with its installation.

Keywords – Solar energy, heat, industry.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
LISTA DE SIMBOLOS E SIGLAS.....	iii
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO	3
1.2.1 Objetivo Geral.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 JUSTIFICATIVA	3
1.4 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA	5
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1 SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR (SAS)	6
2.2 AVALIAÇÃO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS.....	9
2.2.1 Avaliação Técnica.....	10
2.2.2 Análise Econômica	13
2.2.3 Análise Ambiental	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 APLICAÇÃO INDUSTRIAL.....	22
3.1.1 Estimativa da Energia Solar Disponível	22
3.1.2 Dimensionamento do SAS.....	23
3.2 ANÁLISE AMBIENTAL	27
3.3 ANÁLISE ECONÔMICA	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 Análise Ambiental	35
4.5 Análise Econômica	41
5. CONCLUSÃO.....	45
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
REFERÊNCIAS	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Participação de Energias Renováveis na Matriz Energética (BRASIL, 2019)..	4
Figura 2.1– Representação em sequência dos passos indicados para o dimensionamento de um SAS considerando as Perdas Térmicas presentes (Elaboração própria com dados de DUFFIE & BECKMAN, 2014).....	11
Figura 2.2– Representação das relações entre as fases da Avaliação do Ciclo de Vida (Fonte: adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014a).....	17
Figura 2.3– Representação dos Resultados da AICV em impactos Midpoint e Endpoint (Fonte: Adaptado de ALVES, 2018).	18
Figura 3.1– Sequência de Etapas Necessárias para Concepção e Análises Técnica, Econômica e Ambiental de um SAS de Água (Elaboração própria).....	21
Figura 3.2– Representação esquemática do SAS de água objeto de estudo. (BARBOSA & CARVALHO, 2019).....	24
Figura 4.1 – Estimativa para as emissões em kg de CO ₂ -eq.kWh ⁻¹ para diferentes vidas úteis dos sistemas.	36
Figura 4.2– Comparação entre as emissões dos dois sistemas nas fases de fabricação, instalação e operação.	37
Figura 4.3– Contribuição por material utilizado na fabricação e instalação dos sistemas convencional e solar para as emissões de kg CO ₂ .eq.....	38
Figura 4.4–Estimativa para as emissões de carbono acumuladas ao longo dos anos, para ambos sistemas.(Elaboração Própria, 2020).....	39
Figura 4.5–Estimativa para os valores de VPL e TIR calculados de acordo com análises anuais para os 20 anos de vida útil do sistema.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Áreas de aplicação dos sistemas de Aquecimento Solar (SAS) e suas respectivas tecnologias.	6
Tabela 2.2- Classificação dos Sistemas e Aquecimento Solar (SAS) de água.....	7
Tabela 3.1 – Valores Percentuais da Fração Solar final e das Perdas Totais do SAS.....	25
Tabela 3.2 – Características da Caldeira Uni Codens 8000F	26
Tabela 3.3 – Características do coletor Solar Plano S-81 da Solar Tech.	27
Tabela 3.4– Características do Boiler de 2000l da Solar Tech.....	27
Tabela 3.5– Análise de Inventário do Sistema Convencional.	29
Tabela 3.6 –Inventário do Coletor Solar Plano S-81 da Solar Tech.....	29
Tabela 3.7 –Inventário do Boiler 2000l da Solar Tech.....	30
Tabela 3.8– Custo Inicial do Sistema de Aquecimento Solar de Água estudado.....	32
Tabela 3.9– Custo Inicial do Sistema Convencional (Caldeira a gás natural).	32
Tabela 3.10 – Tarifas Aplicadas ao Estado da Paraíba com vigência a partir de 01/05/2020 e homologada pela Resolução ARPB nº 002/2020 de 30/04/2020	33
Tabela 3.11 – Custos anuais de manutenção e operação das alternativas analisadas.....	34
Tabela 4.1- Emissões associadas ao sistema convencional e solar.	35
Tabela 4.2– Comparação dos resultados econômicos obtidos com a literatura.	40
Tabela 4.3– Componentes formadores da taxa de desconto r.	41
Tabela 4.4– Fluxos de caixa e análise do VPL para o Sistema de Aquecimento Solar em um período de 20 anos.	42
Tabela 4.5– Comparação dos resultados econômicos obtidos com a literatura.	44

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida	
ADA	Avaliação de Desempenho Ambiental	
AICV	Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida	
AQS	Água Quente Sanitária	
C	Investimento Inicial	[R\$]
C_p	Calor específico da água	[kJ/kg K]
EES	<i>Engineering Equation Solver Software</i>	
$E_{\text{útil}}$	Demanda diária de energia útil	[kWh/dia]
f	Fração Solar do Sistema	
$F_R(\tau\alpha)$	Coeficiente linear: máxima eficiência	
$F_R(U_L)$	Coeficiente angular: perdas globais	
GCV	Gestão do Ciclo de Vida	
GEE	Gases de Efeito Estufa	
i	Período de tempo considerado na análise do investimento	[anos]
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo	
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas	
ISO	Organização Internacional de Normalização	
L_n	Fluxo de caixa líquido obtido no final do período n	[R\$]
NBR	Norma Técnica Brasileira	
NR	Norma Regulamentadora	
ρ	Massa específica da água	[kg/m ³]
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico	
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico	
PBGÁS	Companhia Paraibana de Gás	
PCS	Poder Calorífico Superior	[kCal/ m ³]

r	Taxa de desconto	
RHI	Incentivo ao Calor Renovável	
SAS	Sistema de Aquecimento Solar	
SGA	Sistema de Gestão Ambiental	
T_{armaz}	Temperatura de armazenamento da água	[°C]
T_{consumo}	Temperatura de consumo da água	[°C]
T_{processo}	Temperatura da água no processo industrial	[°C]
T_{amb}	Temperatura ambiental média anual	[°C]
TIR	Taxa Interna de Retorno	
TMA	Taxa Mínima de Atratividade	
V_{consumo}	Consumo de água diário	[m³]
VPL	Valor Presente Líquido	

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 INTRODUÇÃO

Os últimos acontecimentos têm mostrado ao Brasil e ao mundo todo a importância de se buscar soluções sustentáveis nas diversas áreas da atividade humana. A busca por desenvolvimento econômico, sem respeitar os limites da natureza, pode comprometer não apenas a disponibilidade, mas também a qualidade dos recursos naturais disponíveis em curto, médio e longo prazo.

De acordo com Yilmaz e Can (2019), os impactos ambientais não se limitam as fronteiras dos países ou regiões responsáveis pelo mesmo, o que faz o meio ambiente tornar-se um assunto de interesse comum a todas as nações independente de seu sistema político ou sistema econômico.

Na Constituição Federal Brasileira (BRASIL, 1988) no Art. 225 é declarado o direito que todos têm a um meio ambiente ecologicamente equilibrado, de uso comum e que assegure qualidade de vida para as presentes e futuras gerações, para garantir este direito no § 1º é atribuído ao poder público a responsabilidade de cobrar na forma da lei uma série de deveres que devem ser seguidos por todos, dentre os quais podemos destacar o inciso IV, no qual é clara a necessidade de um estudo de impacto ambiental antecedendo uma instalação ou obra potencialmente causadora de significativa degradação ambiental.

No entanto, para melhorar as taxas de desenvolvimento socioeconômico, há a necessidade de aumentar a oferta interna de energia no país, pois o crescimento econômico proporciona melhores condições de vida e isso reflete diretamente num maior consumo energético. Com a sociedade consumindo mais, por sua vez, os setores produtivos precisam

produzir mais, e tudo isso aumenta a demanda por energia. O grande desafio está em como aumentar a oferta de energia, proporcionar condições ao desenvolvimento econômico e respeitar os limites ambientais para assim evitar danos futuros irreparáveis.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia para o cálculo de impactos ambientais, revelando os pontos críticos e fornecendo base para otimização de um produto, serviço ou processo (GUINÉE, 2001). Em outras palavras, é uma forma de inserir critérios ambientais para a tomada de decisões, sendo possível monitorar o espectro de produção desde a extração da matéria-prima até o uso final do objeto em estudo, incluindo etapas de reuso, reciclagem e destinação final de resíduos (ABNT, 2014a).

Em todo o mundo, o setor industrial possui importante participação na parcela de energia final consumida. No Brasil, em 2018, esse setor foi responsável por 32,7% de toda energia consumida no país (MME, 2019). Grande parte dessa parcela é consumida principalmente nas formas de eletricidade e calor, a eletricidade é usada para iluminação, ar-condicionado e operação de acionamentos de motores; enquanto que a energia térmica é usada para geração de vapor e calor de processo (SHARMA *et al.*, 2017a). A maioria dos processos industriais exigem temperaturas entre 60°C a 250°C (KURUP; TURCHI, 2016).

Atualmente os sistemas de aquecimento de água industriais mais utilizados são as caldeiras, seja a gás ou caldeiras de recuperação. As caldeiras de recuperação são utilizadas para o aproveitamento de fluidos a altas temperaturas que seriam descartados. No entanto, o setor industrial é muito amplo e apresenta uma grande variedade de processos em diferentes faixas de temperaturas e nem sempre as indústrias dispõem deste recurso.

O aquecimento solar em processos industriais já é considerado uma alternativa de energia limpa e renovável em muitos países do mundo (SHARMA *et al.*, 2017b), pois com o uso de tecnologias bem estabelecidas, como coletores e concentradores solares, é possível atingir os níveis de temperatura necessários para satisfazer as demandas de energia industrial.

Diante da importância da análise de impacto ambiental no processo decisório, e considerando a alta demanda por energia térmica presente nesse setor, estudos comparativos entre sistemas de aquecimento de água para processos industriais tornam-se necessários. Esses estudos devem ir além da viabilidade técnica, e incluir aspectos econômicos e ambientais, para verificar os efeitos da implementação de fontes alternativas e renováveis.

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver análises econômica e ambiental para um sistema de aquecimento solar proposto para uma indústria têxtil, e assim contribuir com o desenvolvimento sustentável do país por meio da inserção de sistemas de energias renováveis que apresentem viabilidade técnica, econômica e ambiental.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver uma análise econômica do sistema de aquecimento solar;
- Desenvolver, por meio da Avaliação de Ciclo de Vida, uma análise ambiental para o sistema de aquecimento solar;
- Verificar o potencial de mitigação de mudanças climáticas do sistema proposto em comparação com um sistema tradicional.

1.3 JUSTIFICATIVA

Historicamente, o Brasil apresenta uma matriz energética com uma parcela significativa de energias renováveis, pois mesmo ainda consumindo mais recursos não renováveis do que recursos renováveis, o Brasil utiliza mais fontes renováveis do que o restante do mundo. Pode-se verificar este comportamento no gráfico exposto na Figura 1.1, que foi extraída do Relatório de Síntese do Balanço Energético Nacional 2019 (Ano base 2018) (MME, 2019).

Apesar do Brasil apresentar um crescimento na participação de energias renováveis entre os anos de 2017 e 2018, grande parte dessa parcela é proveniente da produção de eletricidade através de hidroelétricas, mas o com a estiagem nas regiões onde estão instaladas as usinas e com o aumento das restrições ambientais para as construções de novas usinas o aumento da participação das hidroelétricas cresceu apenas 4,1% neste período (MME, 2019). Uma das saídas para que não haja uma regressão na matriz energética brasileira com a redução das renováveis, é o incentivo a exploração do vento e do sol em pequena, média e larga escala, tanto para produção de eletricidade quanto para produção de calor.

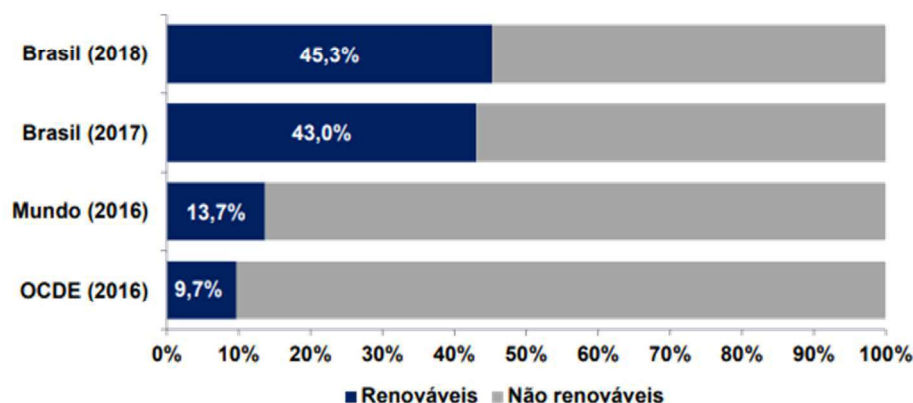


Figura 1.1 - Participação de Energias Renováveis na Matriz Energética (MME, 2019).

A energia solar mostra-se como uma promissora fonte de energias renováveis no mundo todo, pois, tem-se percebido o aumento de sua aplicação em todas as suas formas de aproveitamento (passiva e ativa) nas mais diversas áreas da atividade econômica. O emprego da energia solar na sua forma passiva se trata do aproveitamento da luz e do calor do sol em edificações afim de proporcionar conforto térmico, luminoso e indiretamente uma economia financeira, já na sua forma ativa utilizam-se equipamentos que são capazes de converter a energia solar em eletricidade ou calor para posterior utilização.

No Brasil, a participação da energia solar na matriz energética cresceu 316,1% entre os anos de 2017 e 2018(MME, 2019). Nesta parcela estão incluídas a energia solar fotovoltaica e a energia solar térmica que já a alguns anos é bastante procurada pelos setores residencial e comercial, pois tem a capacidade de proporcionar uma significativa economia energética e financeira, uma vez que é capaz de suprir desde pequenas até grandes demandas de água quente.

O setor industrial brasileiro é o segundo maior consumidor de energia do país, sendo sozinho responsável por aproximadamente um terço de toda a demanda energética nacional, ficando atrás apenas do setor de transportes (MME, 2019). Grande parte desta energia é direcionada para os processos industriais, seja na utilização de energia elétrica como também na geração de energia térmica, também chamado calor de processo.

De acordo com dados publicados no relatório *Solar Heat Worldwide* publicado em 2019 e produzido pela Agência Internacional de Energia (IEA), a energia solar térmica no final de 2018 atingiu uma capacidade instalada de 396 TWh, o que corresponde a uma economia de 42,6 milhões de toneladas de petróleo e 137,5 milhões de toneladas de CO₂.

Essas informações ressaltam o potencial da energia solar térmica para o esforço mundial de reduzir a emissão de gases de efeito estufa (KURUP; TURCHI, 2016).

No Brasil os incentivos a energia solar são dados principalmente na geração fotovoltaica de energia, no entanto, tendo conhecimento do potencial solar brasileiro e das características da demanda de calor de processo nas indústrias, o emprego de tecnologias conhecidas e nacionais, pode contribuir de forma significativa para o aumento da energia solar na matriz energética industrial e consequentemente nacional (BARBOSA; CARVALHO, 2018).

1.4 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa surge da necessidade de desenvolvimento de estudos e avaliações de sistemas solares térmicos aplicados a indústrias, para que assim a utilização dessa aplicação seja mais adotada e disseminada, de forma a contribuir com o desenvolvimento sustentável do país.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR (SAS)

Por meio do emprego de tecnologias adequadas os sistemas de aquecimento solar (SAS) são capazes de atender a diversas finalidades em várias áreas. A Tabela 2.1 relaciona alguns tipos desses sistemas com a tecnologia adotada e a área de aplicação.

Tabela 2.1 – Áreas de aplicação dos sistemas de Aquecimento Solar (SAS) e suas respectivas tecnologias.

Tipo de sistema de aquecimento solar	Tecnologia	Área de aplicação
Aquecimento de água	Coletores planos fechados, Coletores de tubos de vácuo	Setor Residencial, Comercial e Industrial
Aquecimento de piscinas	Coletores planos abertos	Setor Residencial e Comercial
Aquecimento de ar	Secador solar	Setor Industrial
Aquecimento direto	Fogão solar	Setor Residencial
Gerador de potência	Concentradores solares e Chaminé solar	Setor Energético
Dessalinização de água	Fogão solar e coletores fechados	-

Fonte: construído a partir de (PROCOBRE, 2009; RODRIGUES, 2010; KALOGIROU, 2014).

Os SAS são caracterizados pelo emprego de equipamentos capazes de realizar o aproveitamento térmico da radiação solar incidente, por essa razão são clarificados como

sistemas solares ativos (GAUTAM *et al.*, 2017). Como mostrado na Tabela 2.1, SAS de água apresentam diversas possibilidades de aplicações, pois os coletores solares são capazes de atender uma ampla faixa de temperaturas, desde demandas residenciais até demandas industriais de baixas e médias temperaturas, portanto representam uma importante estratégia para o consumo de energia em diferentes setores.

Em aplicações residenciais e comerciais este tipo de sistema pode contribuir com diminuições significativas na demanda de energia do sistema elétrico (CRUZ *et al.*, 2020). No setor industrial, além de apresentar potencial na diminuição do consumo de eletricidade, esses sistemas se apresentam como uma alternativa competitiva a utilização de sistemas geradores de calor de processo e na diminuição da utilização de combustíveis fósseis (GIGLIO *et al.*, 2019).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na NBR 15569 (2020) define os sistemas de aquecimento solar por sistemas compostos por coletor solar, reservatório termossolar, com ou sem aquecimento auxiliar e acessórios e ligações hidráulicas, que funcionam por circulação natural ou forçada, e classifica o SAS de água de acordo com a Tabela 2.2.

Tabela 2.2- Classificação dos Sistemas e Aquecimento Solar (SAS) de água.

Atributo	Categorias
Arranjo	Solar com aquecimento auxiliar, somente solar ou preaquecimento solar
Circulação	Natural (Termossifão) ou forçada
Regime	Acumulação ou passagem
Armazenamento	Convencional, acoplado ou integrado
Alimentação	Exclusiva ou não exclusiva
Alívio de Pressão	Respiro ou conjunto de válvulas

Fonte: (ABNT, 2020)

A configuração adequada a cada sistema de aquecimento solar depende, além da demanda energética, de variáveis ambientais locais, dos recursos financeiros e das condições de instalação disponíveis.

Como a energia solar apresenta sazonalidade, em algumas regiões, em alguns dias do ano, o sistema pode não ser capaz de atender completamente a demanda de água quente, portanto, nessas situações, recomenda-se a utilização de um sistema de aquecimento auxiliar, geralmente a gás, para garantir o aquecimento.

A circulação natural ou por termossifão ocorre por uma variação de pressão provocada pela diferença de densidade entre a água quente e a água fria. A circulação forçada é a que ocorre por meio do emprego de bombas hidráulicas. Nos sistemas de circulação forçada além do emprego da bomba é necessário a utilização de alguns outros equipamentos, como por exemplo sensores e controlador de temperatura. A principal vantagem dessa configuração, é que diferente dos sistemas de circulação natural, os reservatórios térmicos não precisam estar localizados acima do banco de coletores, eles podem ser instalados onde for mais conveniente de acordo com as condições locais (RAMLOW; NUSZ, 2010). Em regiões frias, afim de evitar o congelamento da água na tubulação recomenda-se a utilização de bombas de circulação.

Quanto ao regime, a classificação do sistema é feita de acordo com o emprego de tanques de armazenamento ou não. Quando a água que circula pelos coletores é direcionada diretamente ao consumo, é dispensada a utilização de tanques de armazenamento, e o SAS é classificado com o regime de passagem. O regime de acumulação tem a vantagem de possibilitar o consumo da água quente em diferentes horários do dia, mas aumenta o custo financeiro do projeto (TANG; LI, 2018).

O armazenamento também é classificado de acordo com a distância dos coletores. É classificado como convencional quando está separado dos coletores a uma determinada distância. Quando o armazenamento está montando numa mesma estrutura física que os coletores, ele é classificado como acoplado. O armazenamento integrado é quando a coleta da radiação e o armazenamento são realizados por um único dispositivo (JAMAR *et al.*, 2018).

A alimentação de água fria o SAS pode ser atender apenas a este ou pode ser compartilhada com outros pontos de consumo, classificado, portanto, como exclusiva e não exclusiva, respectivamente (ABNT, 2020).

O alívio de pressão é um parâmetro chave para a segurança e o funcionamento do SAS e tem como objetivo a equalização das pressões positivas e negativas do reservatório térmico usado para o armazenamento de água quente. Pode ser feita pelo emprego de um dispositivo chamado de respiro que nada mais é que uma conexão direta entre o reservatório

térmico e a atmosfera ou pelo emprego de válvulas que são dispositivos mecânicos (ABNT, 2020).

2.2 AVALIAÇÃO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

A avaliação de sistemas energéticos pode ser feita visando mostrar pontos em diversos âmbitos, destacando-se a viabilidade técnica, econômica e ambiental. Assim é possível analisar o projeto considerando sua capacidade de atender às demandas estimadas e sua viabilidade econômica, assim como o impacto ambiental causado pelo mesmo (WITT *et al.*, 2020).

A tomada de decisão é de crucial importância para organizações e empresas e está diretamente ligada a suas performances da organização, logo, o processo decisório precisa ser bem desenvolvido para que as decisões certas possam ser escolhidas. Blank e Tarquin (2009) listam uma série de etapas que devem ser seguidas para o desenvolvimento do processo de tomada de decisões:

1. Entender o problema e definir o objetivo;
2. Coletar dados relevantes;
3. Definir as soluções alternativas viáveis e fazer estimativas realistas;
4. Identificar os critérios para a tomada de decisão usando um ou mais atributos;
5. Avaliar cada alternativa por meio da análise de sensibilidade para melhorar a avaliação;
6. Selecionar a melhor alternativa;
7. Implementar a solução;
8. Monitorar os resultados;

A etapa 1 trata-se da definição do problema e qual solução pretende-se buscar. Para o caso de sistemas energéticos, o problema pode estar relacionado a necessidade de implantação ou aumento da capacidade de um sistema para atender a uma nova demanda, a sua substituição ou a alternativas que busquem melhorar a sua eficiência, por exemplo. Uma vez com o problema bem definido, na etapa 2, busca-se dados referentes as possíveis alternativas para solução do problema.

Com os dados coletados na etapa 2, na etapa 3 são realizadas análises técnicas que busquem retratar de forma mais fiel possível a realidade e assim definir quais alternativas, estabelecidas na etapa 1, são viáveis.

Na etapa 4 são estabelecidos critérios que devem ser observados na tomada de decisão, eles podem ser econômicos e não econômicos. Nesta fase pode-se atribuir, por exemplo, critérios técnicos e ambientais.

Na etapa 6, assim como na etapa 3, o valor do investimento é considerado um fator limitante e é fundamental que seja considerado, pois a melhor alternativa estará sempre entre as alternativas que possam vir a ser implementadas.

As etapas 7 e 8 são as consequências do processo decisório, nessas etapas implementadas a decisão escolhida e a verificação dos resultados. É na etapa 8 que se pode confirmar se foi feita uma boa escolha ou não.

Desenvolver critérios de avaliação e métodos que mensurem de maneira confiável a sustentabilidade é um pré-requisito para selecionar a melhor alternativa (CARVALHO *et al.*, 2013). A multiplicidade de critérios e ferramentas de medição desenvolvidos neste campo mostra a importância do trabalho conceitual e metodológico nesta área. O desenvolvimento e a seleção de critérios requerem parâmetros relacionados à confiabilidade, adequação e praticidade (WANG *et al.*, 2009).

De acordo com Mangla *et al.* (2020), os critérios utilizados para avaliar os sistemas de suprimento de energia nas literaturas dividem-se principalmente em quatro aspectos: critérios técnicos, econômicos, ambientais e sociais.

2.2.1 Avaliação Técnica

A análise da viabilidade técnica de um sistema energético consiste de uma avaliação técnica do sistema como um todo. Desde os critérios e metodologias utilizadas em seu dimensionamento, escolhas de equipamentos, e arranjo da instalação até mesmo simulações numéricas que possibilitem uma estimativa das condições de operações do sistema ao longo do ano (ELLENBECK; LILLIESTAM, 2019), levando em considerações as variações climáticas do local de instalação, que permitam verificar se o sistema é capaz de atender a demanda energética para a qual foi dimensionado.

Para o caso específico de Sistemas de Aquecimento Solar de água, a ABNT na NBR 15569 (2020) estabelece que o dimensionamento do SAS consiste da determinação da área

coletora e do volume de armazenamento necessários para atender a demanda de energia útil determinada no perfil de consumo. A ABNT sugere duas metodologias de cálculo, mas permite a utilização de qualquer procedimento tecnicamente reconhecido. A metodologia de cálculo 2 é indicada para residências unifamiliares e a 1 trata-se do método *f-Chart* como encontrado em Duffie e Beckman (2014).

No entanto, há outros métodos encontrados em Duffie e Beckman (2014) que são bem mais detalhistas que o método *f-Chart*, pois permitem observar as perdas presentes em cada parte do SAS e a identificação dos motivos, afim de propor possíveis soluções e assim um SAS mais eficiente. A sequência de cálculos para o dimensionamento e a determinação da fração solar de um SAS está exemplificada na Figura 2.1.

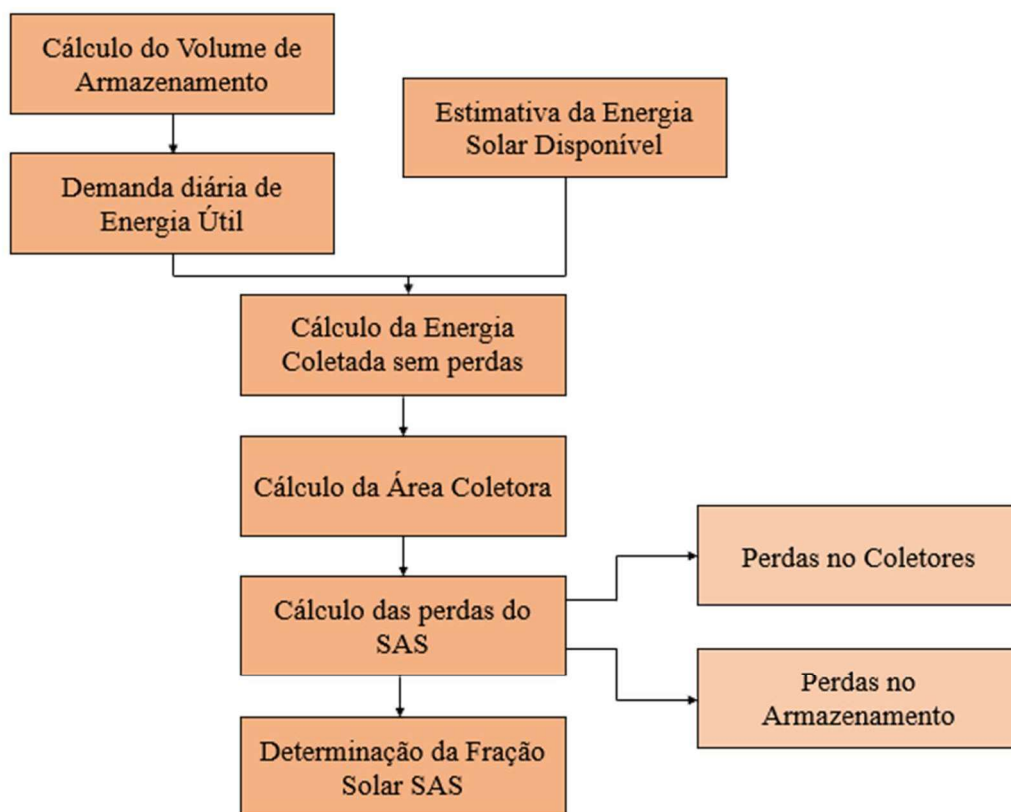


Figura 2.1– Representação em sequência dos passos indicados para o dimensionamento de um SAS considerando as Perdas Térmicas presentes (Elaboração própria com dados de Duffie e Beckman, 2014)

Para a estimativa da energia solar disponível pode-se utilizar diretamente os atlas solarimétricos do Brasil (COLE; PEREIRA, 1998, TIBA, 2000, PEREIRA *et al.*, 2017), no entanto, existem softwares e planilhas de cálculo disponíveis gratuitamente na internet, que

a partir das coordenadas geográficas de uma determinada cidade fornecem valores médios mensais e anuais da radiação solar disponível para diferentes inclinações e orientações, além de que a própria ABNT, na norma NBR 15569:2020 traz um anexo com médias anuais diárias de diversas cidades brasileiras.

A fração solar representa quanto da parcela requerida para o aquecimento de água que é suprida pela energia solar. A ABNT (ABNT, 2020) considera aceitável uma fração solar mínima de 70% em sistemas sem sombreamento no banco de coletores.

Além dos cálculos que comprovem a capacidade de atender a demanda energética, o SAS de água seguir um roteiro de verificações preliminares para avaliação da viabilidade de instalação exigido pela ABNT NBR 15569 (2020), são eles:

- a) identificar a localização das prumadas, os pontos de abastecimento de água fria e o ponto de entrega de água quente;
- b) verificar as características da fonte de energia elétrica, como tensão de alimentação compatível com o equipamento, quadro de comando, corrente dos disjuntores compatível com o equipamento, bitola e estado de conservação dos cabos de ligação, uso de diferencial residual;
- c) verificar o estado de conservação das tubulações de água fria e quente existentes, bem como sua adequação no tocante às dimensões, ao isolamento térmico, às conexões para admissão, à saída e ao dreno da água;
- d) identificar para o(s) coletor(es) solar(es), o(s) reservatório(s) termossolar(es) e a(s) caixa(s) d'água e se o local onde cada um for instalado os comportará;
- e) verificar se a orientação do local de instalação do(s) coletor(es) solar(es) está para o Norte ou se o desvio existente está conforme o recomendado;
- f) identificar possíveis sombreamentos no local de instalação do(s) coletor(es) solar(es), devido às construções vizinhas, árvores, obstáculos ou ao próprio telhado;
- g) verificar se há condições estruturais mínimas para que o peso do(s) coletor(es) solar(es), respectivos suportes, reservatório(s) termossolar(es) e caixa(s) d'água sejam transportados e instalados;
- h) verificar as condições de acesso ao(s) coletor(es) solar(es) e reservatório(s) termossolar(es) para realização da instalação e posterior manutenção e limpeza;
- i) verificar a acessibilidade dos equipamentos nos locais de instalação e, caso seja necessário, se existirem condições para transporte vertical;

- j) identificar todo o material necessário para a instalação e/ou as distâncias aos fornecedores de materiais mais próximos;
- k) verificar se a pressão do ponto de alimentação hidráulica do SAS é compatível com as características dos produtos a serem instalados;
- l) verificar a origem e a qualidade do abastecimento de água fria.

2.2.2 Análise Econômica

A análise econômica na engenharia tem o objetivo de auxiliar a engenheiros, presidentes e a indivíduos a escolha de uma alternativa em detrimento a outra. Boas decisões devem refletir uma escolha bem fundamenta a respeito de como investir capitais financeiros, e essas escolhas devem ter como base análises, sínteses e projetos, ou seja, deve ser considerado tanto fatores econômicos quanto fatores não econômicos, mas esperasse que a decisão de como investir o capital tenha valor agregado a ele no futuro (ZHANG *et al.*, 2018).

No geral, a análise econômica de investimentos, seja esse em um projeto de engenharia ou não, trata-se da comparação entre os gastos e os rendimentos financeiros associados a este investimento por um determinado período de tempo. O primeiro passo para realizar uma análise econômica é escolher quantos e quais os indicadores serão utilizados. Uma vez selecionados, pode-se calcula-los para as alternativas viáveis e então é possível concluir sobre a viabilidade econômica.

Os critérios econômicos mais empregados são o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o *Payback* (tempo de retorno do investimento), pois considera-se esses métodos tradicionais e eficientes na análises de investimentos de projetos (BRIGHAM; EHRHARDT, 2013, HARAMAINI *et al.*, 2019, DUMAN; GÜLER, 2020).

Herrando e Markides (2016) realizaram uma análise tecno-econômica para avaliar o fornecimento de água quente em uma casa típica em Londres, Reino Unido, com coletores solar de placas plana. As estimativas de custo do SAS apresentam um período de retorno do investimento em 11,2 anos. A implementação de um Incentivo ao Calor Renovável (RHI) nos pagamentos trimestrais leva a uma redução no retorno do investimento em cerca de 1 ano, mas se esse incentivo for concedido no início da vida útil do sistema, o retorno será reduzido em cerca de 2 anos.

Yuan *et al.* (2017) compararam os custos operacionais do fornecimento de água quente a 10.000 estudantes chineses considerando uma caldeira padrão a carvão e o SAS. O custo total da caldeira a carvão foi de US\$ 3.19 milhões, para uma vida útil de 15 anos e eficiência térmica de 60%. Para o SAS, o custo associado foi de US\$ 1.61 milhão, para uma vida útil de 15 anos, incluindo o custo de aquecimento elétrico nas horas nas quais a radiação solar não é suficiente.

Endale (2019) avaliou o potencial econômico da energia solar no futuro através de sistemas de aquecimento solar de água na Etiópia. Estima-se que uma área de 5.474 milhões de m² de coletores de placa plana pode economizar 47.730 toneladas de querosene, 45.001 toneladas de diesel, 1480GWh de energia elétrica e 1.698.116 toneladas de lenha em 2025. O custo nivelado da energia solar térmica gerado foi entre 0,022 USD / kWh e 0,133 USD / kWh, enquanto que o custo unitário nivelado da geração de energia a partir de hidrelétricas é de 0,4 USD / kWh.

Hussain *et al.* (2019) analisam o desempenho técnico e econômico de dois aquecedores solares térmicos disponíveis no mercado e fazem comparações com um sistema de aquecimento de água convencional a gás. Os SAS de água apresentam um grande potencial nas áreas do norte do Paquistão e nas regiões quentes do Baluchistão, onde há muito pouco ou nenhum gás disponível, e também possuem uma insolação relativamente alta, com médias de até de 8 kWh / dia / m². O tempo de retorno do sistema convencional foi de 9 anos, enquanto para SAS foi de aproximadamente 3,5 anos.

Kumar *et al.* (2019) fazem uma revisão bibliográfica com o objetivo de classificar sistemas industriais para geração de calor de processos com base nas tecnologias de coletores solares e nas temperaturas de demanda de calor, e assim identifica aplicações do aquecimento solar neste setor. Essas classificações são pertinentes a todos os países quando analisado o mesmo setor em condições climáticas e econômicas semelhantes. Verificou-se que as tecnologias térmicas solares podem ser usadas para uma variedade de aplicações industriais. Além disso, foram delineadas perspectivas futuras de integrar a energia solar térmica para atender a demanda de calor de uma indústria no Paquistão.

Cruz *et al.* (2020) avaliou o potencial técnico-econômico dos sistemas de aquecimento solar de água no setor doméstico no Brasil, dividindo o país em diferentes zonas climáticas e usando uma variedade de parâmetros e condições específicas de cada local. A análise mostra que os sistemas SAS são economicamente viáveis para 17,9% dos casos considerados até 2020, levando a uma economia de até 15,54 TWh / ano. Apesar de não ter

os melhores recursos solares, a região Sul do país tem os melhores resultados, enquanto a região Sudeste tem o melhor potencial econômico.

Ratner *et al.* (2020) investigou as perspectivas para o desenvolvimento de coletores solares na indústria das regiões sul da Rússia. Economicamente os coletores solares ainda são inviáveis quando comparados com as caldeiras convencionais que operam com combustíveis baratos de hidrocarbonetos (custo nivelado de eletricidade médio esperado de 3,8 a 6,6 rublos / kWh, comparando as tarifas atuais de 1,5 a 2 rublos / kWh em uma área de aquecimento urbano). No entanto, a instalação de coletores solares pode muito bem ser considerada uma opção atraente para o investimento na modernização de equipamentos desgastados e desatualizados das caldeiras tradicionais de empresas industriais, o que permite substituir parcialmente as fontes de hidrocarbonetos e diminuir a intensidade de carbono da economia russa.

2.2.3 Análise Ambiental

De acordo com PEREIRA (2012) foi a partir da conferencia ambiental sobre meio ambiente – Rio 92, que surgiu a ação de desenvolvimento de indicadores para avaliar a sustentabilidade. A ideia era estabelecer padrões de desenvolvimento, que permitissem avaliações ambientais, mas que incluíssem também os âmbitos econômicos, sociais, éticos e culturais.

A busca por esse novo posicionamento da sociedade em relação ao desenvolvimento tornou necessário a idealização e o aprimoramento de ferramentas de gestão que permitissem às empresas a avaliação ambiental de suas decisões (WILLERS *et al.*, 2013). A demonstração, compreensão e melhoria do desempenho ambiental de empresas e organizações pode ser obtido a partir da administração de elementos das suas atividades, produtos e serviços.

De acordo com a NBR ISO 14031 (ABNT, 2015), a Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA), consiste basicamente em: Identificar os aspectos ambientais, determinar os aspectos que serão tratados como significativos, estabelecer os critérios para o seu desempenho ambiental e avaliar o seu desempenho ambiental com base nos critérios estabelecidos.

O objetivo da implantação da ADA é facilitar decisões que permitam melhorias contínuas ao desempenho ambiental das organizações a partir de frequentes análises críticas a partir dos critérios ambientais estabelecidos ao seu desempenho.

Geralmente a ADA é implantada no meio empresarial por meio de um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) que estabeleça as condições necessárias para a viabilidade econômica, minimização dos impactos ambientais e que assim, possibilitem produtos e serviços mais sustentáveis, que atendam as normas regulatórias e tragam vantagens competitivas de mercado (RODRIGUES *et al.*, 2015).

Nesse contexto nasce a Gestão do Ciclo de Vida (GCV) que se trata de um sistema de gestão de produtos que tem o objetivo de promover uma interação harmônica entre os recursos naturais e as necessidades sociais, através da quantificação e diminuição dos impactos ambientais desde a extração da matéria prima até o descarte do produto final (MENDES *et al.*, 2016).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta da ADA que quantifica os impactos ambientais por meio do acompanhamento sistemático de produtos ou processos ao longo de todo seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas, fabricação, uso, descarte e reciclagem (CABEZA, *et al.*, 2014).

A ACV pode ser classificada quanto ao foco e quanto a abordagem (IBICT, 2020). Quanto ao foco a ACV se divide em seis tipos: produto; processo; social; organizacional; custos; sustentabilidade. Quanto a abordagem a ACV se divide em dois tipos: atribucional e consequential. A abordagem e o foco da ACV são definidos de acordo com o objetivo do estudo.

A ACV atribucional ou tradicional faz uso de dados históricos, informações mensuráveis de incertezas conhecidas e aborda todos os processos que podem ser atribuídos ao sistema do produto durante o seu ciclo de vida. A ACV atribucional expõe os impactos ambientais e os fluxos de recursos referentes a uma determinada unidade funcional. A ACV consequential descreve as alterações nos impactos e nos fluxos de recursos naturais como consequência de mudanças no ciclo de vida do produto, ou seja, reflete uma cadeia genérica de suprimentos hipotéticos modelados que consideram políticas públicas e respostas sociais (ALVES, 2018).

A normatização da ACV foi feita pela *International Organization for Standardization* (ISO 14040, 2006, ISO 14044, 2006), traduzidas no Brasil pela ABNT na NBR ISO 14040: 2014 e na NBR ISO 14044: 2014. Tais normas dividem o método da ACV

em quatro fases: Definição de objetivo e escopo; Análise de inventário; Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida (AICV) e Interpretação dos resultados. A Figura 2.2 mostra a interatividade entre as etapas da ACV.

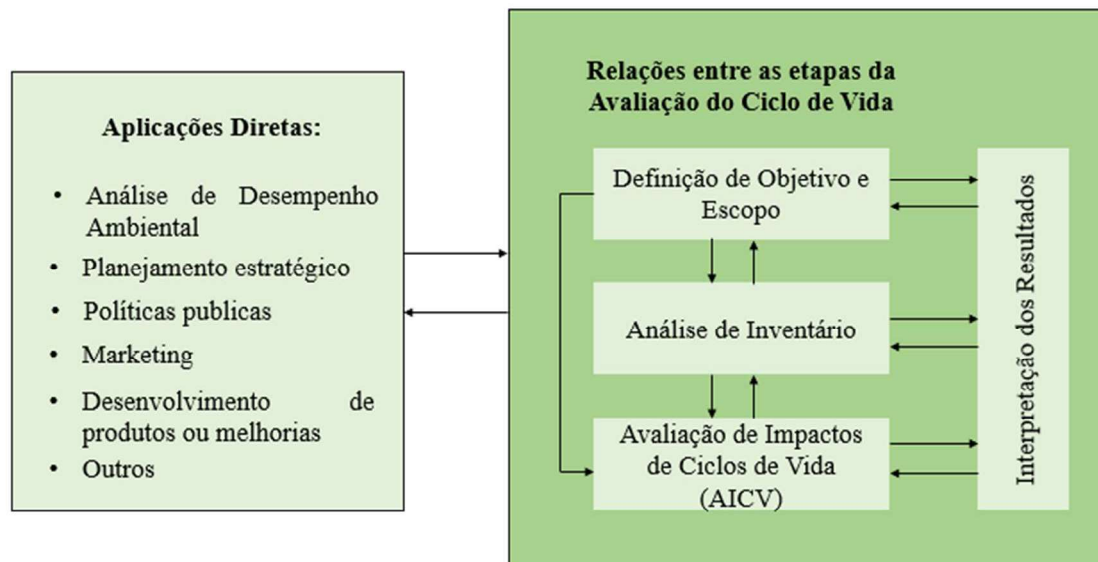


Figura 2.2– Representação das relações entre as fases da Avaliação do Ciclo de Vida (Fonte: adaptado de ABNT, 2014a).

A etapa de AICV é responsável por compreender e avaliar os impactos ambientais reunidos na etapa de análise de inventário, essa avaliação é traduzida em indicadores capazes de demonstrar os impactos ambientais assim como definidos na etapa de definição de objetivo e escopo.

A etapa de interpretação dos resultados consiste da interpretação dos resultados obtidos, analisando a sensibilidade e incertezas das análises para qualificar as conclusões e dar suporte para a tomada de decisões.

Existem diversas metodologias de AICV integradas em *softwares* empregados em estudos de ACV, como por exemplo o *software* SimaPro (COMPOLINA *et al.*, 2015), no entanto, esses métodos utilizam diferentes critérios ambientais e avaliam diferentes aspectos. A escolha de qual método usar deve ser realizada de acordo com o sugerido pela ABNT (ABNT, 2014b) que indica que a seleção da metodologia e da base de dados utilizada na AICV deve ser consistente com o objetivo dos estudos, pois a escolha do método implica em diferentes representações dos resultados.

Os métodos de AICV podem ser subdivididos basicamente em dois grupos: *midpoint* e *endpoint*. Essa classificação é feita de acordo com como se pretende obter a representação

dos resultados (ALVES, 2018). Nos métodos *endpoint* os resultados obtidos são convertidos e exibidos em categorias de impactos que refletem questões socioambientais, já nos métodos *midpoint* os resultados são relacionados a categorias de impactos ambientais (Figura 2.3).

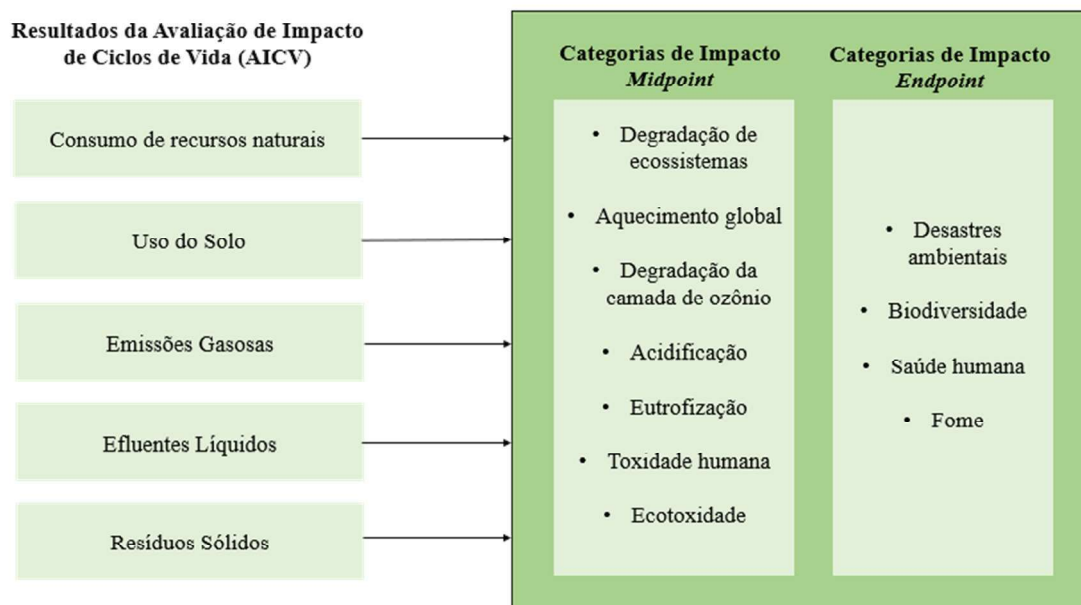


Figura 2.3– Representação dos Resultados da AICV em impactos Midpoint e Endpoint (Fonte: Adaptado de ALVES, 2018).

Os métodos *endpoint* são mais empregados no meio empresarial quando a intenção da ACV é impactar a comunidade em geral, em estratégias de marketing e mercado por exemplo, mas as incertezas e questionamentos presentes nestes modelos faz com que os métodos *midpoint* sejam mais requisitados no meio científico.

Considerando a análise ambiental, Ardente *et al.* (2005) ressaltaram que a inclusão das matérias-primas de componentes nas análises de ACV é de fundamental importância, pois de fato as emissões relacionadas são responsáveis por 80 a 90% das emissões totais.

Masruroh *et al.* (2006) aplicaram a ACV para quantificar os prováveis impactos ambientais causados pela implantação de um sistema de aquecimento solar em desenvolvimento, este sistema é baseado em reações exotérmicas e endotérmicas para armazenamento de energia. O resultado da ACV mostra que cada 1 GJ de energia produzido promove a emissão de 6,3 a 10 kg de CO₂. Quando comparado com sistemas convencionais o sistema solar em estudo oferece condições ambientais favoráveis.

Chiavetta *et al.* (2011), por meio da ACV, realizaram uma análise ambiental comparando um sistema de aquecimento de água movido a energia geotérmica e outro

movida a energia solar. Os resultados mostraram valores menores de impacto ambiental para o sistema geotérmico.

A avaliação de De Laborderie *et al.* (2011) demonstrou que nos sistemas de aquecimento residencial solar, os fatores de maior relevância na emissão de CO₂-eq foram os tanques de armazenamento e os painéis solares, representando 76% do total das emissões. Para uma análise de sistema de aquecimento residencial com coletor de 4m² de área e tanque de armazenamento de 150 dm³.

Hang *et al.* (2012) avaliaram os sistemas de aquecimento solar de água para os edifícios residenciais típicos dos EUA. É feita a comparação entre SAS de água com diferentes configurações e sistemas de aquecimento convencionais (gás natural e eletricidade) em três diferentes locais. As análises revelam que o uso diário de água quente tem os efeitos mais significativos no rendimento energético e econômico do sistema em todos os locais avaliados. Os resultados de retornos energéticos e econômicos dos sistemas de aquecimento com tecnologias solares são menores a 6 meses e a ACV mostra o retorno ambiental entre 4 a 13 anos quando tomado o sistema de aquecimento elétrico como referência.

Martinopoulos *et al.* (2013) fizeram uma análise comparativa entre sistemas de aquecimento solar fabricados com diferentes materiais e técnicas. Em todos os casos estudados notou-se que os impactos ambientais ocasionados pelos sistemas solares são significativamente menores que os causados pelo sistema elétrico de apoio, no entanto, verificou-se que a maior contribuição para o impacto ambiental dos sistemas solares se dá pela alteração de suas características técnicas e consequentemente sua menor eficiência, e não diretamente pelo material utiliza.

Comodi *et al.* (2014) fizeram um estudo ambiental de dois sistemas de aquecimento de água solar domésticos, um com painéis com coberturas de vidro e outro com coletores solares sem cobertura. Usaram a metodologia da ACV do berço ao túmulo obtendo, com o método Eco-Indicator 99, obtendo impactos ambientais dez vezes mais baixos para o sistema sem vidro.

Na busca por um sistema doméstico de aquecimento de água mais sustentável para a realidade de pouca irradiância solar do Reino Unido, Greening e Azapagic (2014) compararam dois tipos de SAS de água com outros convencionais (a gás, por eletricidade e por bombas). Para todas as comparações, os sistemas solares reduziram mais de 70% os

impactos de aquecimento global e depleção de combustíveis fósseis, por outro lado, aumentam os impactos de toxicidade humana e os de ecotoxicidades.

Foi feita uma avaliação ambiental em 32 distintos sistemas de aquecimento solar de água por Zambrana-Vasquez *et al.* (2015). Sete configurações associadas a sistemas auxiliares com 4 tipos de combustíveis, a saber: biomassa, eletricidade, gás natural e diesel. Além disso, foram analisados mais 4 casos-base. Os resultados se mostraram mais favoráveis para os sistemas de aquecimento solar que trabalhavam em conjunto com a biomassa, com os maiores tempos de retornos energéticos quando comparados aos demais.

Kylili *et al.* (2018) aplicaram a ACV para avaliar os impactos ambientais causados por sistemas de aquecimento solar de água aplicados a indústrias na Europa. Os resultados mostraram que em aplicações com demanda energética entre 35 a 75 GJ obtém-se uma economia de carbono de 2 a 5 toneladas de CO₂/kW, dependendo da localização geográfica.

Albertí *et al.* (2019) compararam o desempenho ambiental de dois cenários: um sistema solar térmico para fornecer água quente sanitária (AQS) usados em conjunto com um sistema tradicional de aquecimento a gás natural e o sistema de aquecimento a gás natural por si próprio. Pontos fracos são encontrados e diferentes cenários de design ecológico são avaliados para alcançar uma economia mais circular. Quando avaliado a categoria de impacto aquecimento global, o sistema solar apresenta uma economia de 65%, porém, em outras categorias como acidificação e eutrofização o sistema solar apresenta resultados negativos, por isso a redução potencial de emissões em geral, se 30% dos AQS fossem cobertos por fontes solares, resultaria apenas entre 0,38% e 0,50% no caso da Espanha e entre 0,12% e 0,63% na China. Esses resultados se dão principalmente devido o material empregado na fabricação dos equipamentos que compõem o sistema solar.

Liu *et al.* (2019) realizaram uma avaliação do ciclo de vida do berço ao túmulo em vários sistemas de água quente doméstica típicos em cinco regiões climáticas da China. Também foram levadas em consideração variações no fornecimento de energia e clima nessas regiões e o grau de eficiência energética dos sistemas de água quente sanitária. Os resultados indicaram que cerca de 25,7% das emissões de gases de efeito estufa devido ao uso doméstico de água quente na China podem ser reduzidos melhorando a eficiência energética, estimulando o uso de fontes de energia renováveis, no entanto, mostra também a necessidade de otimizar os materiais usados na fabricação dos sistemas de aquecimento solar, pois os materiais utilizados apresentam altas potências de toxicidade humana e ecológica.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram realizadas pesquisas teóricas fundamentadas em estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental de sistemas energéticos, afim de fornecer aporte científico para estabelecer um seguimento metodológico coerente. A Figura 3.1 apresenta um fluxograma com a sequência de etapas estabelecidas e seguidas para o desenvolvimento das análises.

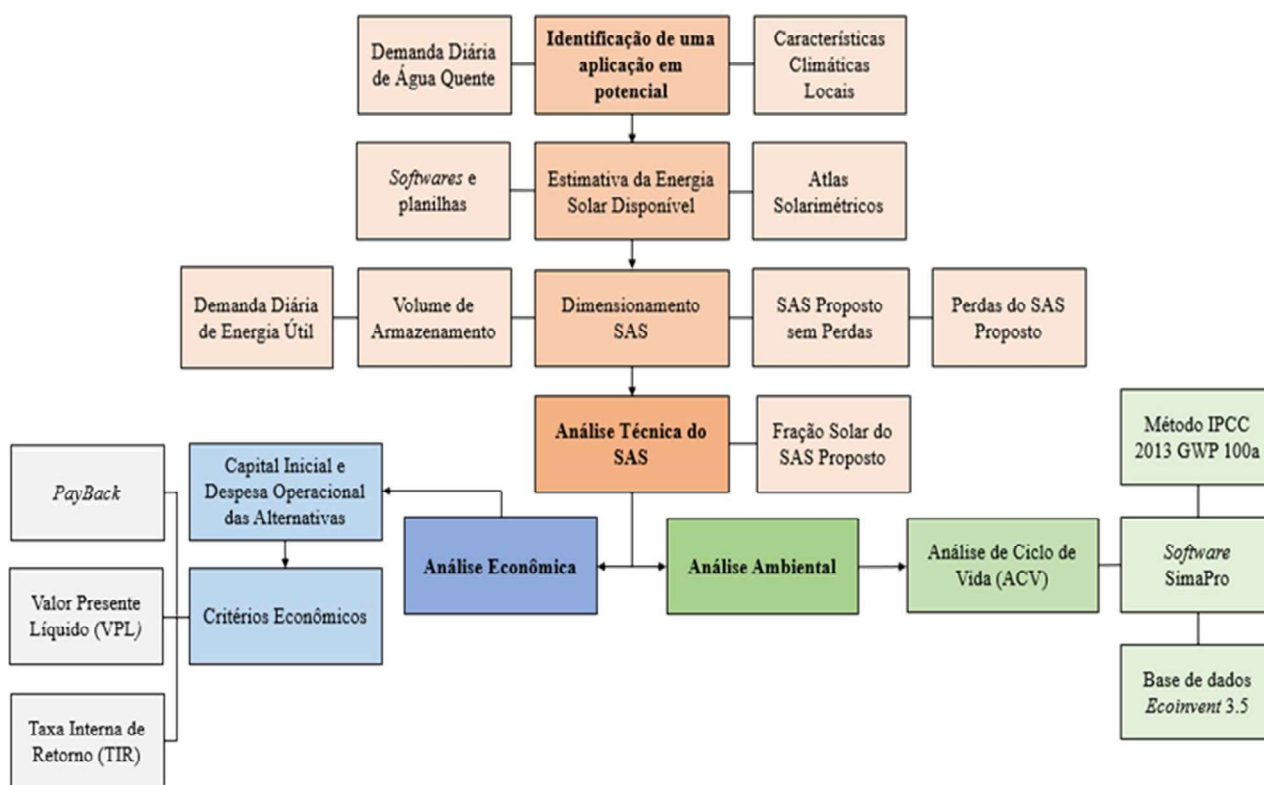


Figura 3.1– Sequência de Etapas Necessárias para Concepção e Análises Técnica, Econômica e Ambiental de um SAS de Água (Elaboração própria).

3.1 APLICAÇÃO INDUSTRIAL

Com o foco no setor industrial e identificando o potencial da energia solar térmica na indústria têxtil, para o desenvolvimento deste trabalho foi analisada a necessidade de água quente em uma indústria têxtil de beneficiamento, de pequeno porte, localizada no distrito industrial da cidade de João Pessoa, (Latitude 7,06° Sul; longitude 34,5° Oeste; Altitude 7,43 m), Paraíba, Brasil.

A indústria em questão foi modelada por Barbosa e Carvalho (2019), considerando que no processamento de tecidos de algodão ou viscose (e suas composições com fibras sintéticas) são necessários 82 L de água quente por kg de tecido processado. Nessas condições, a indústria têxtil apresenta uma demanda mensal de água quente com temperaturas entre 50 a 60°C, e uma vazão de consumo de aproximadamente 0,12 kg/s (432 kg/h)

As características climáticas do local (médias mensais de temperaturas, valores mínimos e máximos de temperatura, médias mensais da velocidade do vento, valores de umidade relativa, índice de nebulosidade e valores de Insolação total mensal, em número de horas de sol) foram consultadas no banco de dados Climaticus 4.2 (ALUCCI, 2011).

Barbosa e Carvalho (2019) dimensionaram e comprovaram a viabilidade técnica de um SAS de água proposto respeitando as demandas energéticas e as condições climáticas locais. Diante disto, nas próximas seções, no que diz respeito ao dimensionamento e a viabilidade técnica, será apresentada apenas uma breve descrição. Mais detalhes estão apresentados em Barbosa e Carvalho (2018; 2019). Este trabalho visa realizar análises econômicas e ambientais deste sistema afim de comprovar a sua viabilidade destes pontos de vista.

3.1.1 Estimativa da Energia Solar Disponível

Além dos atlas solarimétricos brasileiros (COLE; PEREIRA, 1998, TIBA, 2000, PEREIRA *et al.*, 2017), a ABNT, na norma NBR 15569:2020 (ABNT, 2020) fornece médias anuais diárias de diversas cidades brasileiras, porém, esses dados são mais usados afim de estimativas rápidas e comparativas. Para análises mais detalhadas, onde pretende-se conhecer a variação sazonal da capacidade do SAS, médias mensais diárias permitirão uma análise mês a mês da capacidade de geração do SAS.

Médias mensais diárias podem ser facilmente obtidas, a partir das coordenadas geográficas, utilizando softwares e planilhas de cálculo disponível na internet, que a partir das coordenadas geográficas fornecem valores médios mensais e anuais da radiação solar.

Barbosa e Carvalho (2019) utilizaram o *software* RadiaSol 2 (UFRGS, 2010), desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em 2010, e disponibilizado gratuitamente para *download* na internet.

3.1.2 Dimensionamento do SAS

A ABNT sugere, para SAS em aplicações diferentes da unifamiliar, o método *f-Chart* como encontrado em Duffie e Beckman (2014), mas a mesma, permite a escolha de qualquer procedimento tecnicamente reconhecido. Barbosa e Carvalho (2019) optaram por aplicar um método também encontrado em Duffie e Beckman (2014), mas bem mais detalhista que o método *f-Chart*. A escolha dessa metodologia foi justificada pelo objetivo de observar as perdas presentes em cada parte do SAS, a identificação dos motivos, e proposta de possíveis soluções para assim, obter um SAS mais eficiente.

Para o dimensionamento, os seguintes passos foram seguidos: cálculo do volume de armazenamento; cálculo da demanda diária de energia útil; SAS proposto sem perdas; cálculo das perdas no SAS proposto.

O cálculo do volume de armazenamento (V_{armaz}) e da demanda diária de energia útil ($E_{\text{útil}}$) foram realizados conforme indicado na NBR 15569:2020 (ABNT, 2020) e expostos nas Equações 3.1 e 3.2, respectivamente.

$$V_{\text{armaz}} = \frac{V_{\text{consumo}} (T_{\text{consumo}} - T_{\text{amb}})}{(T_{\text{armaz}} - T_{\text{amb}})} \quad (3.1)$$

$$E_{\text{útil}} = \frac{V_{\text{armaz}} \rho C_p (T_{\text{armaz}} - T_{\text{amb}})}{3600} \quad (3.2)$$

Onde: V_{consumo} é o consumo diário (m^3); T_{consumo} é a temperatura de consumo de utilização; T_{armaz} é a temperatura de armazenamento da água ($T_{\text{armaz}} > T_{\text{consumo}}$); T_{amb} é a temperatura ambiente média anual do local da instalação; ρ é a massa específica da água igual a 1000 kg/m^3 ; C_p é o calor específico da água a pressão constante, igual a $4,18 \text{ kJ/kg K}$;

A demanda de energia útil (kWh/dia) representa a quantidade de energia diária necessária para aquecer a o volume diário de água necessário até a temperatura desejada. A Figura 3.2 mostra o esquema do SAS proposto.

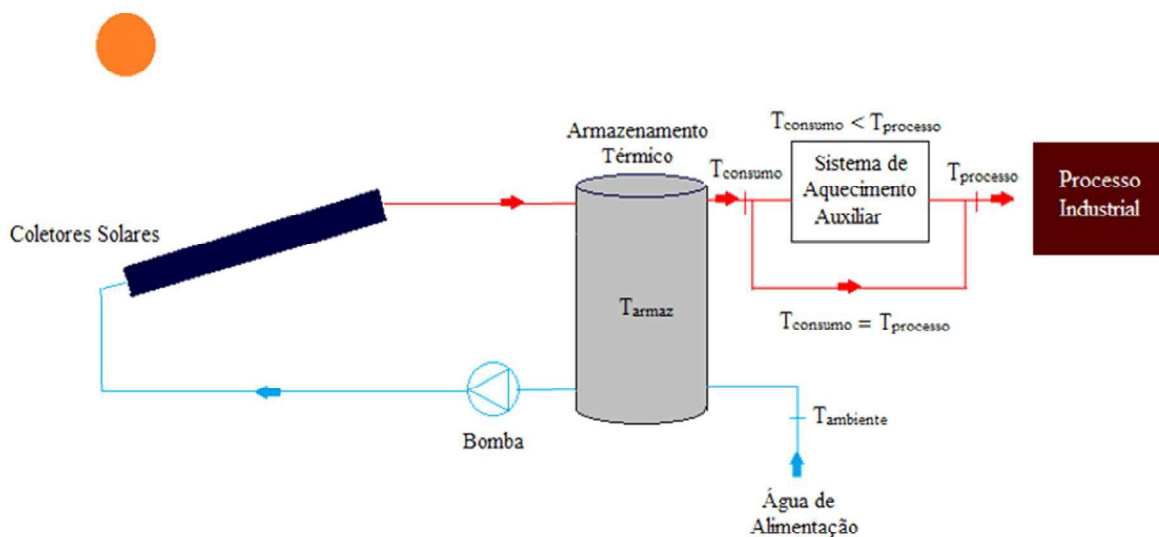


Figura 3.2– Representação esquemática do SAS de água objeto de estudo. (BARBOSA; CARVALHO, 2019).

O sistema proposto apresenta as seguintes características técnicas: volume de armazenamento de 16 m³, sendo 8 tanques de 2000l da Solar Tech; temperatura de armazenamento de 70°C; demanda diária de energia útil: 401,24 kWh/dia ou 60,1920 MJ/h; Área coletora de aproximadamente 95 m², sendo composta por 55 coletores solar plano S-81 da Solar Tech (BARBOSA; CARVALHO, 2019).

Para determinação da área de coletores foram realizadas estimativas iniciais, onde foram considerados valores médios da radiação, da temperatura ambiente local e desconsideradas as perdas térmicas devido ação do vento.

Por meio da aplicação da 1ª Lei da termodinâmica em cada um dos componentes do sistema, considerando a conservação da massa e regime permanente, são obtidas as equações que formarão um sistema a ser resolvido posteriormente. Os valores inicialmente calculados foram usados como ponto inicial de sucessivas interações no *Software Engineering Equation Solver* (EES) (BARBOSA; CARVALHO, 2019), afim de obter estimativas da fração solar para todos os meses do ano.

Depois de proposto o SAS e calculadas as frações solares médias mensais em condições ideais, foi possível quantificar as perdas térmicas presentes no sistema e assim a sua fração solar real. As perdas foram divididas de acordo com o local da instalação onde ocorrem, foram elas: Perdas nos coletores solares e perdas no armazenamento.

A energia útil coletada é a fração da energia que é absorvida pelo coletor e convertida em energia térmica, ou seja, é a diferença entre a energia solar incidente no coletor e a perda para o ambiente. A quantificação das perdas térmicas do SAS de água proposto e o cálculo da energia útil coletada seguiram as instruções de cálculos de Duffie e Beckman (2014), por meio de cálculos interativos realizados no *software* MATLAB (BARBOSA; CARVALHO, 2019).

3.1.3 ANÁLISE TÉCNICA DO SAS DE ÁGUA

Uma vez que o SAS solar de água tenha sido dimensionado respeitando todos os critérios exigidos pela ABNT, e a partir do conhecimento das principais perdas térmicas presentes, a análise técnica do sistema proposto irá consistir da verificação da sua capacidade de atender a demanda para a qual foi dimensionado. Essa verificação é feita através da fração solar do SAS, que representa quanto da energia térmica obtida é proveniente da energia solar.

A Tabela 3.1 mostra a fração solar (f) obtida por Barbosa e Carvalho (2019) para o sistema estudado.

Tabela 3.1 – Valores Percentuais da Fração Solar final e das Perdas Totais do SAS.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
f	120%	124%	113%	95%	90%	73%	75%	99%	113%	135%	146%	143%
Energia perdida	10%	17%	10%	11%	11%	12%	12%	11%	10%	10%	10%	10%

Fonte: Barbosa e Carvalho (2019)

Considerando que o sistema seria viável do ponto de vista técnico se apresentasse frações solares mensais superiores a 50%, no entanto a ABNT, na NBR 15669 (2020), considera que sistemas sem sombreamento nos coletores, são aceitáveis se apresentarem no mínimo uma fração solar de 70%.

Na maioria dos meses a fração solar final, ou seja, calculada considerando as perdas térmicas presentes no sistema, é mais do que suficiente para atender a demanda de água

quente analisada, e mesmo nos meses mais críticos, como junho e julho, o sistema apresenta uma capacidade de atender a demanda energética de pouco mais de 70%, portanto, trata-se de um SAS de água viável do ponto de vista técnico e operacional, tanto pelos critérios adotados por Barbosa e Carvalho (2019), quanto pela recomendação na normativa da ABNT. Com a viabilidade técnica do SAS verificada, agora busca-se verificar a viabilidade ambiental e econômica desse sistema.

3.2 SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

Nas subseções a seguir serão brevemente descritas as características técnicas dos equipamentos que compõem o sistema convencional e o sistema solar, respectivamente.

3.2.1 Sistema Convencional

Como sistema convencional foi considerado uma produção de calor típica baseada em combustível fóssil, uma caldeira a gás natural. Com potência nominal de 377 kW, a caldeira a gás Uni Codens 8000F da BOSCH atende à necessidade instantânea da maior demanda de energia diária requerida pelo processo industrial.

A Tabela 3.2 mostra as especificações técnicas sobre as condições de operação da caldeira a gás selecionada.

Tabela 3.2 – Características da Caldeira Uni Codens 8000F

Caldeira Uni Codens 8000F (400W)	
Rendimento a 100% da capacidade	97,1%
Potência útil do gás (60°-80°C)	366 kW
Potência nominal do gás (60-80°C)	377 kW
Conteúdo de água	680 l
Conteúdo de gás na combustão	541 l

Fonte: BOSCH (2020)

3.2.2 SISTEMA SOLAR DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

As características técnicas dos coletores e dos boilers utilizados encontram-se nas Tabelas 3.3 e 3.4, respectivamente.

Tabela 3.3 – Características do coletor Solar Plano S-81 da Solar Tech.

Especificações Técnicas (S-81)	
Área Externa	1,78 m ²
Área Transparente	1,72 m ²
Peso do Coletor Seco	29 kg
Pressão Máxima de Operação	250 kPa
Fluido de Trabalho	Água
Eficiência Térmica	51,8%
$F_R(\tau\alpha)$	0,645
$F_R(U_L)$	5,334

FONTE: (GREEN – PUC Minas, 2003).

Tabela 3.4– Características do Boiler de 2000l da Solar Tech.

Boiler 2000 l – SolarTech	
Comprimento	2,65 m
Largura	1,07 m
Altura	1,12 m
Isolante Térmico	Poliestireno Expandido
Espessura do isolante	0,05 m

FONTE: (SOLARTECH, 2016).

3.3 ANÁLISE AMBIENTAL

A ferramenta de Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA) escolhida foi a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Com a ACV do sistema de aquecimento de água industrial, pretende-se avaliar se há vantagens ambientais de se usar a energia solar em

detrimento da energia gerada por combustíveis fósseis em um sistema convencional. Ambos os sistemas serão descritos com detalhes na próxima subseção. Alguns elementos, comuns aos dois sistemas (convencional e solar), como bombas, tubulações e sistemas de controle, não serão considerados nas análises, entende-se que esses elementos comuns apresentam a mesma contribuição em ambas as análises e, portanto, podem ser desconsideradas sem prejuízo a comparação dos resultados.

Visando contabilizar os impactos ambientais desses sistemas foi adotado o software SimaPro v.9.1.0.8 (SIMAPRO, 2020) e base de dados Ecoinvent 3.6 (2019), uma das mais recentes e cujos processos escolhidos caracterizam uma ACV atribucional. O método adotado foi o IPCC 2013 GWP 100a (IPCC, 2013), portanto, uma única categoria de impacto será considerada, o aquecimento global, expressa em kg CO₂-eq ao longo de um horizonte temporal de 100 anos, que serve para contemplar as sequelas cumulativas dos gases de efeito estufa.

As ACV desenvolvidas incluem extração da matéria prima, fabricação dos componentes, transportes, instalação e operação do produto, destino final. Contudo, foi dado apenas uma possibilidade para o descarte final do sistema, o aterro sanitário. Não se consideraram as atividades relacionadas às manutenções dos sistemas. O volume de água aquecido por ano não é contemplado, visto que é uma entrada comum aos dois sistemas. A unidade funcional será atender a demanda de energia anual da indústria, considerando a vida útil de ambos os sistemas como 20 anos.

3.3.1 Sistema Convencional

Para a análise de inventário do ciclo de vida foi construída uma lista de materiais, incluindo os requisitos de energia do processo (Tabela 3.5), onde considera-se também o consumo acumulativo de gás natural, exigido pela caldeira durante o processo de operação, sendo estimado em função da necessidade anual de energia para o aquecimento da água do sistema industrial em estudo (NITKIEWICZ; SEKRET, 2014).

O equipamento escolhido para compor o sistema convencional é fabricado na cidade de Berlim, Alemanha, e deve ser entregue em João Pessoa, portanto o cálculo do transporte foi contabilizado de forma a contemplar os deslocamentos marítimos e rodoviários.

Considerou-se que a indústria já possui linha de abastecimento de gás natural, não necessitando de novas instalações de infraestrutura de abastecimento de gás. As cargas ambientais referentes à manutenção não foram contabilizadas.

Tabela 3.5– Análise de Inventário do Sistema Convencional.

Material / Insumo Energético	Quantidade
Aço	1200 kg
Aço Inox	25 kg
Eletricidade	0,02 GJ _{eletricidade} / GJ _{calor*}
Gás	1,04 GJ _{gás} / GJ _{Calor*}
Transporte Marítimo	8200 km
Transporte Rodoviário	410 km
Consumo Anual de Gás	13.457 m ³

Fonte: Elaboração própria (2020).

3.3.2 Sistema de Aquecimento Solar de Água

Nas Tabelas 3.6 e 3.7 estão detalhados os respectivos materiais dos coletores e dos *boilers* utilizados no sistema. Os equipamentos são fabricados em João pessoa e um percurso de aproximadamente 9 km é necessário para sua instalação no Distrito Industrial de João Pessoa.

Tabela 3.6 –Inventário do Coletor Solar Plano S-81 da Solar Tech.

Composição material do coletor solar (S-81)

Componente	Material	Quantidade
Cobertura de vidro	Vidro	0,00516 m ³
Placa Absorvedora	Alumínio + Tinta absorvedora	3,85 kg
Caixa de Contenção	Alumínio Extrudado	3,60 kg
Arranjo de Tubos	Cobre Puro	2,18 kg
Vedação	Silicone	0,10 kg
Solda	Foscooper	0,02 kg
Isolante Térmico	Lã de Rocha	1,10 kg

Fonte: construído a partir de dados do fabricante (SOLAR TECH, 2019).

Tabela 3.7 –Inventário do Boiler 2000l da Solar Tech.

Composição material do Boiler 2000l (Solar Tech)		
Componente	Material	Quantidade
Anodo de Sacrifício	Magnésio	0,62 kg
Isolante Térmico	Poliestireno Expandido	4,56 kg
Revestimento Externo	Chapa de Alumínio	25,20 kg
Revestimento Interno	Aço Inox 304	74,65 kg
Conexões	Aço Inox 304	0,316 kg

Fonte: construído a partir de dados do fabricante (SOLAR TECH, 2019).

3.3 ANÁLISE ECONÔMICA

A avaliação pela regra do VPL é método muito utilizado em todos os setores da economia e é comumente usada para avaliar a rentabilidade de projetos de energia a longo prazo (WANG *et al.*, 2009). Trata-se da soma dos valores presentes dos fluxos de caixa, que ocorrem ao longo do período de tempo determinado para a realização da análise, ou seja, é a diferença do valor presente das receitas menos o valor presente dos custos (URTADO *et al.*, 2009), como mostrado na Equação 3.1:

$$VPL = \sum_{n=1}^i \left[\frac{L_n}{(1+r)^n} \right] - C \quad (3.1)$$

C representa o investimento inicial, i representa o período de tempo considerado na análise de viabilidade do investimento, L_n o fluxo de caixa líquido obtido no final do período n , e r representa a taxa de desconto, também denominada taxa mínima de atratividade (TMA) ou custo de oportunidade do capital a investir.

Uma vez calculado, a regra para a tomada de decisão sobre o VPL de projetos independentes segue:

- Se o $VPL > 0$: Projeto viável;
- Se o $VPL < 0$: Projeto inviável.

A taxa identificada como TMA representa o mínimo que se pretende lucrar ao fazer um investimento, ou o máximo que se pretende pagar por este investimento. A TMA é formada por três componentes: o custo de oportunidade, o risco do negócio e a liquidez do

negócio. O custo de oportunidade se baseia em lucros se esse capital fosse investido em rendimentos de baixo risco, como por exemplo, a caderneta de poupança. O risco de negócios considera que o lucro do investimento deve pagar o seu risco. A liquidez que pode ser descrita como um índice que mede a facilidade de mudar de posição no mercado para assumir outra, como a taxa Selic que é o parâmetro utilizado pelos bancos para determinar a taxa diária de juros dos empréstimos feitos de um ao outro, e que influencia diretamente na formação de índices como Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) (PILÃO; HUMMEL, 2003 *apud* DA FONTOURA *et al.*, 2018).

A Taxa Interna de Retorno (TIR) corresponde à taxa de desconto que zera o valor presente líquido de um investimento. A TIR representa a rentabilidade, é essa taxa que anula o valor do capital inicialmente investido no projeto. De acordo com Sviech e Montovan (2013), a TIR pode ser comparada com a TMA mínima desejada, ou ser atribuída como taxa de retorno. Quando o valor estimado da TIR for maior que a TMA o investimento é viável, pois além de recuperar o capital investido inicialmente e pagar os custos deste investimento, possivelmente trará lucros remanescentes (BRIGHAM; EHRHARDT, 2013).

Matematicamente, a TIR é calculada obtendo-se o valor da r na Equação (3.1) igualando-se o valor do VPL a zero, como mostrado na Equação 3.2:

$$C = \sum_{n=1}^i \left[\frac{L_n}{(1+r)^n} \right] \quad (3.2)$$

O *Payback* é do que o período de retorno necessário para que todo o investimento inicial seja recuperado. Quanto menor este período, mais rápido o investimento inicial será recuperado (WANG *et al.*, 2009), em outras palavras o *Payback* indica o período de tempo necessário para o VPL seja zero e o investimento comece a ser rentável.

O *Payback* é usado para analisar investimentos com tecnologia específicas que promovem a redução de emissões, pois mesmo sem considerar os pontos de vistas ambientais e sociais na análise econômica, permite comparar durante um período de tempo específico, os custos de operações usando tecnologias com um menor investimento com os custos de operação empregando tecnologias mais caras, mas que promovem uma considerável redução de emissões (MAHLIA *et al.*, 2011, ZIS *et al.*, 2016).

Para a análise econômica, assim como na análise ambiental, pretende-se realizar um comparativo entre as vantagens financeiras do sistema de energia solar em relação ao sistema convencional já mencionado, a caldeira a gás natural. Nas Tabelas 3.8 e 3.9 estão detalhados

os respectivos custos associados a instalação do SAS proposto e do sistema convencional, respectivamente.

Tabela 3.8– Custo Inicial do Sistema de Aquecimento Solar de Água estudado.

Investimento Inicial em Equipamentos do SAS de Água		
Componente	Valor Unitário	Valor Total
Coletor Solar S-81	R\$ 1.256,00	R\$ 69.080,00
Boiler 2000l	R\$ 8.990,00	R\$ 71.920,00
Tubulações, conexões e acessórios	-	R\$ 8.630,40
Instalação e custos indiretos	-	R\$ 22.444,56
Investimento Inicial		R\$ 172.074,96

Fonte: SOLAR TECH (2019).

O custo referente a tubulações, conexões e acessórios do SAS diz respeito as conexões entre os painéis e entre os painéis e os reservatórios térmicos (boilers). As tubulações e conexões responsáveis pela distribuição da água no processo industrial comuns aos dois sistemas analisados e não farão parte da análise de investimento.

Tabela 3.9– Custo Inicial do Sistema Convencional (Caldeira a gás natural).

Investimento Inicial para o Sistema Convencional	
Componente	Valor Unitário
Caldeira Uni Codens 8000F 400W	R\$ 136.184,00
Instalação e custos indiretos	R\$ 34.046,00
Investimento Inicial	R\$ 170.230,00

Fonte: BOSCH (2020).

A caldeira a gás analisada como alternativa convencional ao SAS proposto, mesmo não sendo fabricada no Brasil, como mencionado anteriormente, pode ser adquirida com representantes brasileiros. Os custos referentes a importação já são incluídos no valor do equipamento.

Um outro custo que deve ser levado em consideração são os custos associados a operação e manutenção de cada um dos sistemas. O SAS de água não apresenta custos operacionais e baixíssimos custos de manutenção ao longo de sua vida útil, no entanto, apresenta uma vida útil de aproximadamente 25 anos (SOLAR TECH, 2019), o que

comparado a vida útil das caldeiras é considerado baixo. É comum se encontrar caldeiras com mais de 30 anos em plena operação, porém, para que isso ocorra com segurança, é preciso que criteriosas manutenções e inspeções sejam realizadas, assim como exigido pela norma regulamentadora de vasos de pressão, a NR-13 (2019).

Para que seja possível realizar comparações entre os custos de manutenção e operação das duas alternativas, na análise econômica, assim como a análise ambiental, será realizada com base em um período de tempo de 20 anos.

Os valores referentes as tarifas vigentes cobradas pelo gás natural fornecido pela PBGÁS (2020) encontram-se na Tabela 3.10. Esses valores são aplicados em cascata e o gás natural é fornecido sobre as seguintes condições: Poder Calorífico Superior de 9.400 kcal/m³ (39,33 kJ/l); Temperatura = 293,15°K (20° C); e Pressão = 1 atm (1,033kg/cm²).

Tabela 3.10 – Tarifas Aplicadas ao Estado da Paraíba com vigência a partir de 01/05/2020 e homologada pela Resolução ARPB nº 002/2020 de 30/04/2020

Tarifas Aplicadas ao Setor Industrial		
Faixas	Consumo (m ³ /semana)	Tarifa com impostos (R\$/m ³)
1	0 - 700	2,5044
2	700 – 3500	2,4920
3	3500 – 7000	2,4133
4	7000 – 21.000	2,3301
5	21.000 - 70.000	2,2850
6	70.000 - 105.000	2,2372
7	105.000 - 210.000	2,1784
8	210.000 – 350.000	2,1393
9	350.000 – 700.000	2,0508
10	700.000 – 840.000	1,9654
11	840.000 – 1.400.000	1,9021
12	Acima de 1.400.000	1,8828

Fonte: PBGÁS (2020)

O PCS do combustível é definido como a quantidade de calor produzida a partir de 1 m³ desse combustível. Com essas informações foi possível calcular uma vazão volumétrica de gás natural, que foi estimado em aproximadamente 9,15 l/s (9,15 x 10⁻³ m³/s) o que resulta em um volume semanal de 5.533,92 m³.

O consumo semanal de gás natural estimado se enquadra nas faixas 1, 2 e 3 da Tabela 3.10. O valor total de despesas com combustível por semana é de R\$ 13.639,14.

De acordo com a NR-13 (LEGISLAÇÃO DO MINISTÉRIO DO TRABALHO, 1995) as caldeiras flamotubulares se enquadram como do tipo A, e essas devem apresentar inspeções a cada 12 meses. A manutenção preventiva deve ser realizada de acordo com os relatórios obtidos a cada inspeção.

A manutenção dos sistemas de aquecimento solar de água é realizada de acordo com a necessidade do mesmo, trata-se principalmente da substituição, se necessária, de alguma componente danificado pelo tempo, ou seja, trata-se basicamente de manutenção corretiva. Esses danos são mais propensos a ocorrer em regiões que apresentem amplitudes térmicas relevantes e quando a água que circule nos coletores apresente uma considerável concentração de sais.

Nas análises de investimentos será considerado apenas os investimentos que se podem planejar e controlar, portanto, os custos de manutenção corretiva não serão contabilizados. Na Tabela 3.11, encontra-se estimativas dos custos de operação e manutenção preventivas das alternativas estudadas.

Tabela 3.11 – Custos anuais de manutenção e operação das alternativas analisadas.

	SAS	Convencional
Manutenção anual	R\$ 0,00	R\$ 24.000,00
Operação anual	R\$ 0,00	R\$ 654.678,72

Fonte: Elaboração própria (2020).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise Ambiental

As análises consideraram uma demanda anual de energia térmica para aquecimento de água de 136.836 kWh, resultando em 2.736.729 kWh durante toda vida útil dos sistemas, estimada em 20 anos.

Para ambos os sistemas, as emissões associadas à construção estão relacionadas aos equipamentos e materiais necessários para montar o sistema (extração da matéria prima, fabricação dos componentes, transportes, instalação e operação do produto, e descarte em aterro sanitário). Quanto às emissões operacionais, somente foram consideradas para o sistema convencional, e estão relacionadas ao consumo de gás natural para atender à demanda de água quente, totalizando um consumo de 22.135,68 m³/mês de gás natural (equivalente a 241.721,63 kWh/mês de gás natural). A Tabela 4.1 mostra as emissões de carbono associadas a cada sistema.

Tabela 4.1- Emissões associadas ao sistema convencional e solar.

	Sistema Convencional	Sistema Solar
Construção (kg CO ₂ -eq/ano)	189,17	642,87
Operação (kg CO ₂ -eq/ano)	32.909,45	-
Total (kg CO ₂ -eq/ano)	33.098,62	642,87

Fonte: Elaboração própria (2020).

As emissões de carbono totais associadas a construção dos sistemas foram divididas por 20 anos, resultando em kg CO₂-eq/ano. As emissões operacionais foram contabilizadas por ano, e, portanto, também expressas em kg CO₂-eq/ano.

Verifica-se que o sistema convencional é caracterizado por uma carga menor de emissão durante a fase de construção (189,17 kg CO₂-eq/ano), sendo a fase de operação a parcela mais significativa das emissões (32.909,45 kg CO₂-eq/ano). Já para o sistema de aquecimento solar, apenas a fase de construção contribui (642,87 kg CO₂-eq/ano), pois consideramos que a fase de operação deste sistema não necessita de energia.

A influência da adoção de prazos de vida operacionais de 5, 10 e 20 anos foi examinada, para determinar o impacto de emissão de kg CO₂-eq kWh⁻¹ gerado para os dois sistemas, conforme exposto na Figura 4.1.

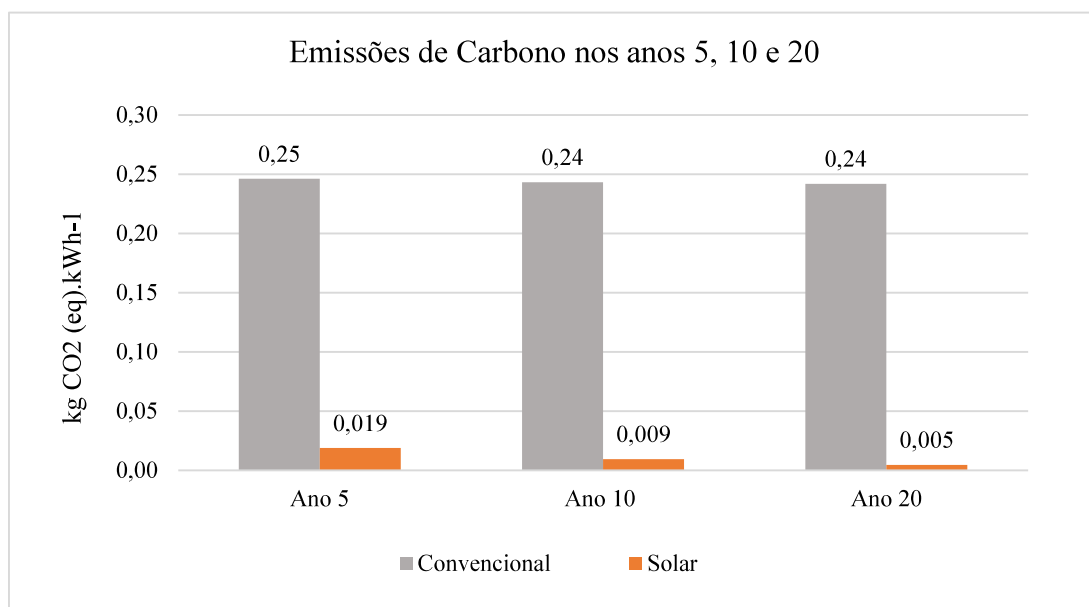


Figura 4.1 – Estimativa para as emissões em kg de CO₂-eq kWh⁻¹ para diferentes vidas úteis dos sistemas.

Como já observado, o sistema convencional é caracterizado por gerar uma carga de emissão muito maior na operação, devido a queima de gás natural, do que na instalação. Pelo fato de as emissões referentes ao processo de instalação serem relativamente pequenos em relação às emissões referentes a operação, o valor de carga para uma vida útil de 5 anos é um pouco maior, porém a tendência é dele se estabilizar na faixa das emissões de operação ao longo dos anos. Desta maneira para uma vida útil de 20 anos a taxa de emissões é de 0,24 kg CO₂-eq kWh⁻¹.

No sistema solar a emissão de carbono origina-se somente do processo de instalação, já que não foram consideradas emissões associadas a manutenção e operação desse sistema. Portanto, quanto maior for a vida útil do sistema solar, maior será a quantidade de energia produzida e consequentemente menor ficará a taxa de emissão de $\text{kg CO}_2\text{-eq kWh}^{-1}$.¹ Nota-se que para uma instalação com vida útil de 5 anos a taxa é de $0,019 \text{ kg CO}_2\text{-eq kWh}^{-1}$, sendo que para 20 anos essa taxa é reduzida para $0,05 \text{ kg CO}_2\text{-eq kWh}^{-1}$.

A Figura 4.2 mostra graficamente o comportamento das emissões acumuladas, de ambos os sistemas, ao longo dos 20 anos analisados. Nota-se que, enquanto no sistema solar a fase de fabricação e instalação é responsável por 100% das emissões em kg de $\text{CO}_2\text{-eq}$, a fase de instalação do sistema convencional contribui apenas com uma pequena parcela das suas emissões de carbono ao longo da vida útil (aproximadamente 0,6%).

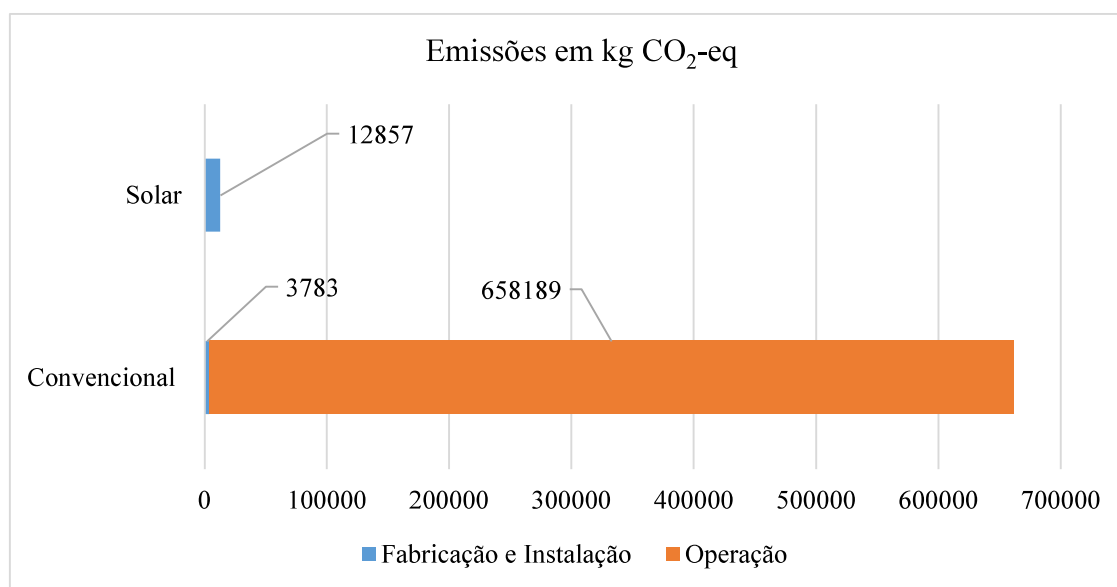


Figura 4.2– Comparação entre as emissões dos dois sistemas nas fases de fabricação, instalação e operação.

As emissões de kg de $\text{CO}_2\text{-eq}$ nas fases de fabricação e instalação foram consideradas provenientes dos materiais utilizados, do transporte e do descarte final do equipamento. Na fase de operação foi considerado o consumo de combustíveis e eletricidade.

Após análise dos percentuais de contribuição dos materiais envolvidos no processo de fabricação dos componentes dos dois sistemas, verificou-se que no sistema convencional, o aço foi o material que teve a maior porcentagem de contribuição com 66,6% das emissões associadas à construção. Para o sistema solar, o alumínio foi o material que teve o maior

percentual de contribuição (47,8%), seguido do aço inox (22,3%), do cobre (7,9%) e do vidro (6%). Do impacto final do sistema solar, 224,77 kg CO₂-eq/ano devem-se aos boilers, e 418,10 kg CO₂-eq/ano aos coletores

A Figura 4.3 mostra os percentuais de contribuição dos materiais envolvidos no processo de fabricação dos componentes dos dois sistemas analisados e as emissões provenientes do transporte do local de fabricação ao local de instalação, assim como as emissões dos sistemas considerando o descarte em aterro sanitário.

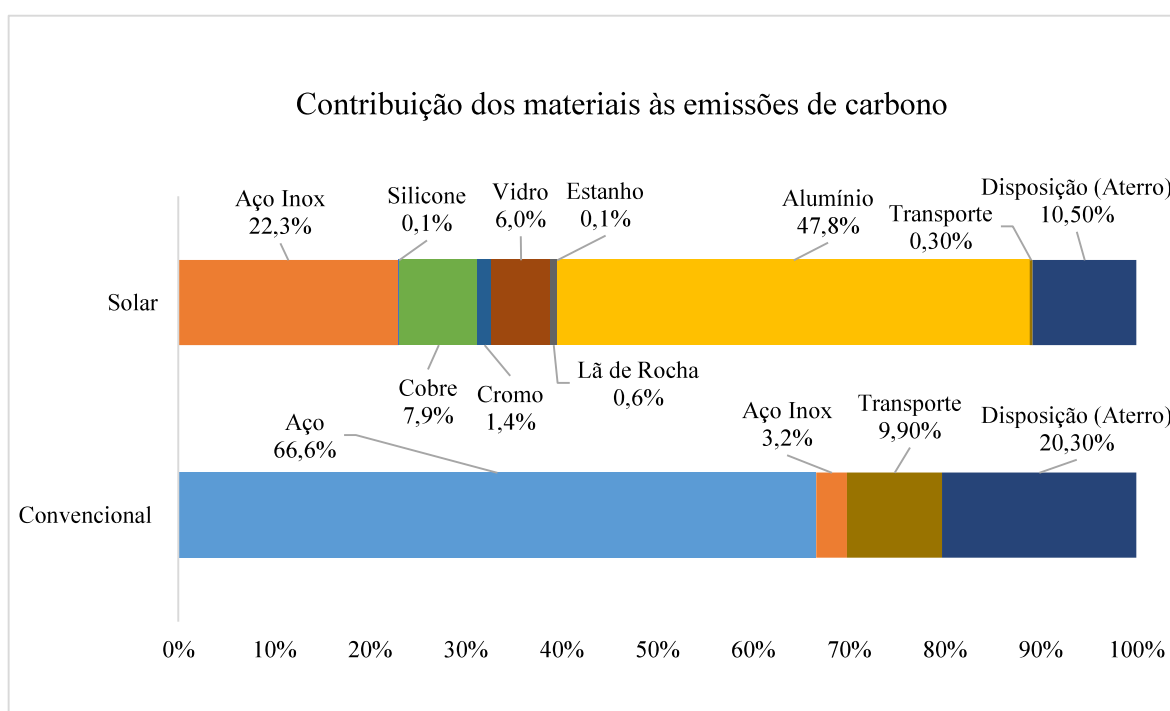


Figura 4.3– Contribuição por material utilizado na fabricação e instalação dos sistemas convencional e solar para as emissões de kg CO₂-eq.

Ao observar a Figura 4.3 é possível identificar quais os pontos que mais contribuem para impactos ambientais ocasionados pelos dois sistemas, e a partir disso, pode-se buscar alternativas que possibilitem minimiza-los.

As informações obtidas na Figura 4.3 podem ser usadas para buscar novas opções de materiais para os sistemas, assim como também mostra pontos importantes a serem considerados na aquisição dos equipamentos, como por exemplo a distância entre o local de fabricação e o local de instalação. O sistema solar é fabricado em João Pessoa, enquanto que o sistema convencional é fabricado em Berlim, na Alemanha, sendo necessário o transporte

marítimo e rodoviário, o que explica o fato de o transporte do sistema convencional ser responsável por 9,9% de toda sua emissão de CO₂ ao longo de 20 anos de operação.

Uma outra questão importante na ACV é a disposição final dos equipamentos. Nas análises foram consideradas que tanto o sistema convencional quanto o sistema solar seriam direcionados a aterros sanitários. A título de comparação, o sistema solar apresenta um impacto menor do que o sistema convencional, mesmo tendo o mesmo destino final (Ver Figura 4.3), no entanto, esse um fator responsável por uma considerável parcela das emissões de CO₂ dos dois sistemas, que ressalta a importância de buscar um descarte adequado.

Como verificado, os sistemas analisados apresentam características distintas nas emissões de carbono, torna-se, portanto, necessário fazer uma análise de comportamento das emissões acumuladas, ao longo dos anos, para cada sistema. A seguir descreve-se o comportamento de ambos os sistemas em relação as emissões acumuladas por um período de 20 anos.

Observando a Figura 4.4 percebe-se que desde a instalação até antes do primeiro ano de operação, o sistema convencional emite menos poluentes que o sistema de aquecimento solar.

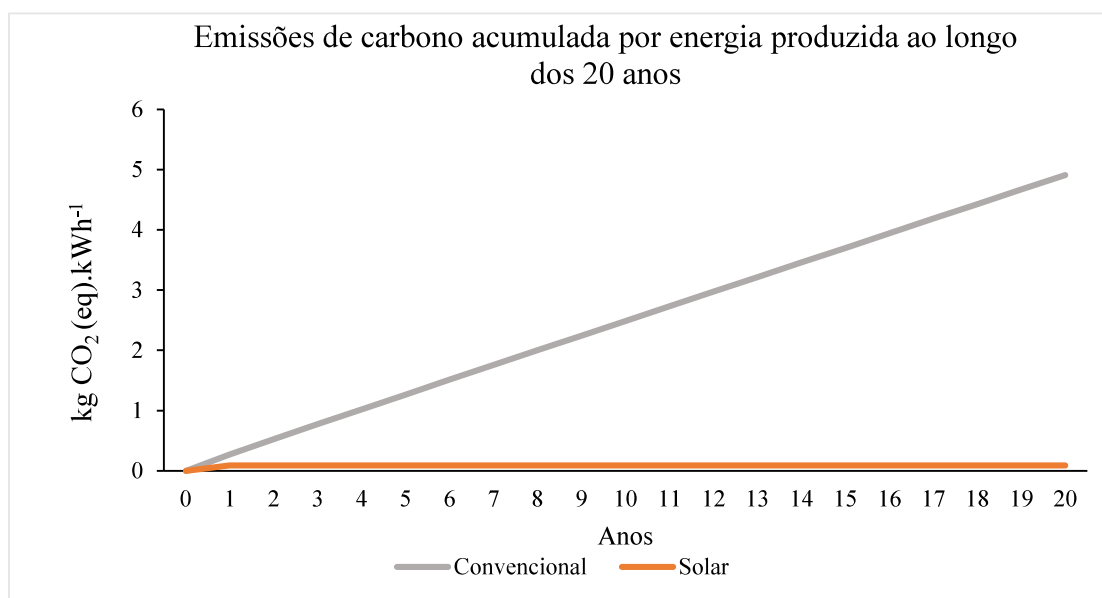


Figura 4.4—Estimativa para as emissões de carbono acumuladas ao longo dos anos, para ambos sistemas.(Elaboração Própria, 2020).

Como já mostrado anteriormente, no sistema solar a maior contribuição de emissão de poluentes durante sua vida útil é dada na fase de instalação, pois este não depende de

insumos energéticos para a sua operação. Já no caso do sistema convencional, apesar das emissões de sua instalação serem significativamente menores, em sua operação este necessita de combustíveis e eletricidade, o que faz com que ao longo dos anos sua emissão acumulada seja bem mais expressiva.

A Figura 4.4 apresenta um comportamento já esperado, pois verificou-se na revisão bibliográfica, que no geral, os sistemas de geração solar apresentam, por meio da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), menores taxas de emissão de CO₂-eq quando comparados com sistemas convencionais de geração de energia.

A Tabela 4.2 faz uma comparação entre os resultados ambientais obtidos neste trabalho com os resultados encontrados na literatura. Nota-se que todos os sistemas analisados apresentam redução nas emissões de carbono, quando em países com maiores índices de insolação, essa redução é mais significativa, o que se pode entender, que ocorre devido a influência das condições climáticas na eficiência térmica dos sistemas solares de aquecimento.

Tabela 4.2– Comparação dos resultados econômicos obtidos com a literatura.

Autor(es)	Resultados obtidos neste trabalho	Herrando e Markide, 2016	Yuan <i>et al.</i>, 2017	Kylili <i>et al.</i>, 2018	Greening e Azapagic (2014)
Local	João Pessoa, Brasil	Londres, Reino Unido	Shandon, China	Europa	Reino Unido
Finalidade	Aquecimento industrial	Água quente domiciliar	Água quente (alojamento estudantil)	Aquecimento industrial	Água quente domiciliar
Volume	16000 L	150 L	360000 L		
Energia	144,45 MWh/ano	1,0 MWthh		35 a 75 GJ	
Redução nas emissões de CO ₂	32 t CO ₂ -eq/ano	0,8 t CO ₂ /ano	460 kt CO ₂ /ano	2 a 5 t de CO ₂ /kW	70% menos que sistemas convencionais
Indicador de referência	0,002 t CO ₂ -eq/ ano L	0,005 t CO ₂ / ano L	1,27 t CO ₂ /ano L		

O indicador de referência foi calculado afim de fornecer um parâmetro de equivalência entre os resultados comparados e assim facilitar uma avaliação dos sistemas comparados nas mesmas condições.

Observa-se também que quanto maior o volume diário de água quente, maior a energia requerida para aquecimento e consequentemente, maior a economia de CO₂- ao se utilizar energia solar térmica. SAS de água maiores proporcionam uma maior economia de CO₂- /L de água aquecido, uma vez que economizam também uma parcela maior de energia que poderia vim de fontes fósseis.

1.5 Análise Econômica

A Tabela 4.3 mostra os parâmetros que compõem a taxa de desconto r , também conhecida como Taxa Mínima de Atratividade (TMA), usada no cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) em seguida.

Tabela 4.3– Componentes formadores da taxa de desconto r .

Composição da taxa de desconto (r)	
Custo de oportunidade	2% a.a
Risco do Negócio	5% a.a
Liquidez do Investimento	5% a.a
Taxa de desconto r	12% a.a

Fonte: Elaboração própria (2020).

O custo de oportunidade foi adotado como a taxa Selic atual, que segundo o Banco Central do Brasil, em reunião no dia 05 de agosto de 2020, estabeleceu uma meta da taxa de Selic de 2,00% ao ano. O risco de negócio e a liquidez do investimento foram considerados, ambos, como sendo de 5% ao ano, o que resulta em uma taxa de atratividade ou de desconto, r , de 12% a.a.

A Tabela 4.4 apresenta os fluxos de caixa descontados ao tempo zero associados a cada ano. Os valores referentes a receita do sistema solar, trata-se dos valores economizados anualmente com combustível e manutenção preventiva no sistema convencional a gás

descrito anteriormente. O somatório dos fluxos líquidos presentes resulta no Valor Presente Líquido que foi calculado para os 20 anos analisados.

Também se encontra na Tabela 4.4 o VPL de cada ano respectivo, calculado de acordo com a Equação 3.2. Nota-se que desde o primeiro ano, o investimento no sistema de aquecimento solar, pelo critério do VPL, mostra-se viável economicamente, pois já apresenta um VPL maior que zero.

A Figura 4.5 mostra o comportamento crescente do VPL, positivo deste o período de 1 ano, e o comportamento da Taxa Interna de Retorno (TIR), que também classifica o sistema de energia solar com viável economicamente, pois apresenta um valor superior à taxa de desconto r considerada (12%).

Tabela 4.4– Fluxos de caixa e análise do VPL para o Sistema de Aquecimento Solar em um período de 20 anos.

		Fluxo de Caixa Anual		Fluxo Líquido Presente		VPL	
Investimento Inicial	C	-R\$	172.074,96	-R\$	172.074,96	R\$	-
Ano 1	L1	R\$	678.678,72	R\$	605.963,14	R\$	433.888,18
Ano 2	L2	R\$	678.678,72	R\$	541.038,52	R\$	974.926,70
Ano 3	L3	R\$	678.678,72	R\$	483.070,11	R\$	1.457.996,81
Ano 4	L4	R\$	678.678,72	R\$	431.312,60	R\$	1.889.309,41
Ano 5	L5	R\$	678.678,72	R\$	385.100,53	R\$	2.274.409,94
Ano 6	L6	R\$	678.678,72	R\$	343.839,76	R\$	2.618.249,70
Ano 7	L7	R\$	678.678,72	R\$	306.999,79	R\$	2.925.249,49
Ano 8	L8	R\$	678.678,72	R\$	274.106,95	R\$	3.199.356,44
Ano 9	L9	R\$	678.678,72	R\$	244.738,35	R\$	3.444.094,79
Ano 10	L10	R\$	678.678,72	R\$	218.516,38	R\$	3.662.611,17
Ano 11	L11	R\$	678.678,72	R\$	195.103,91	R\$	3.857.715,09
Ano 12	L12	R\$	678.678,72	R\$	174.199,92	R\$	4.031.915,01
Ano 13	L13	R\$	678.678,72	R\$	155.535,65	R\$	4.187.450,66
Ano 14	L14	R\$	678.678,72	R\$	138.871,11	R\$	4.326.321,77
Ano 15	L15	R\$	678.678,72	R\$	123.992,06	R\$	4.450.313,83
Ano 16	L16	R\$	678.678,72	R\$	110.707,20	R\$	4.561.021,03
Ano 17	L17	R\$	678.678,72	R\$	98.845,71	R\$	4.659.866,75
Ano 18	L18	R\$	678.678,72	R\$	88.255,10	R\$	4.748.121,85
Ano 19	L19	R\$	678.678,72	R\$	78.799,20	R\$	4.826.921,05
Ano 20	L20	R\$	678.678,72	R\$	70.356,43	R\$	4.897.277,48

Fonte: Elaboração própria (2020).

O valor da TIR, já para o primeiro ano apresenta um valor de 294%, o que representa um valor quase 25 vezes maior do que a taxa mínima de atratividade adotada (r), ou seja, mesmo que os valores escolhidos para compor a taxa de desconto sejam considerados maiores que os escolhidos, o sistema de aquecimento solar ainda se mostraria viável segundo

o critério da TIR em um curto espaço de tempo. A TIR a partir do quarto ano se estabiliza em 394%.

Quanto ao *Payback*, o sistema de aquecimento solar apresenta um período de retorno do investimento de 5 meses. O que significa que a partir do quinto mês de operação, o sistema de aquecimento solar terá se pago e começara a gerar lucro a partir das economias ocasionadas pela substituição de um sistema de aquecimento convencional a gás.

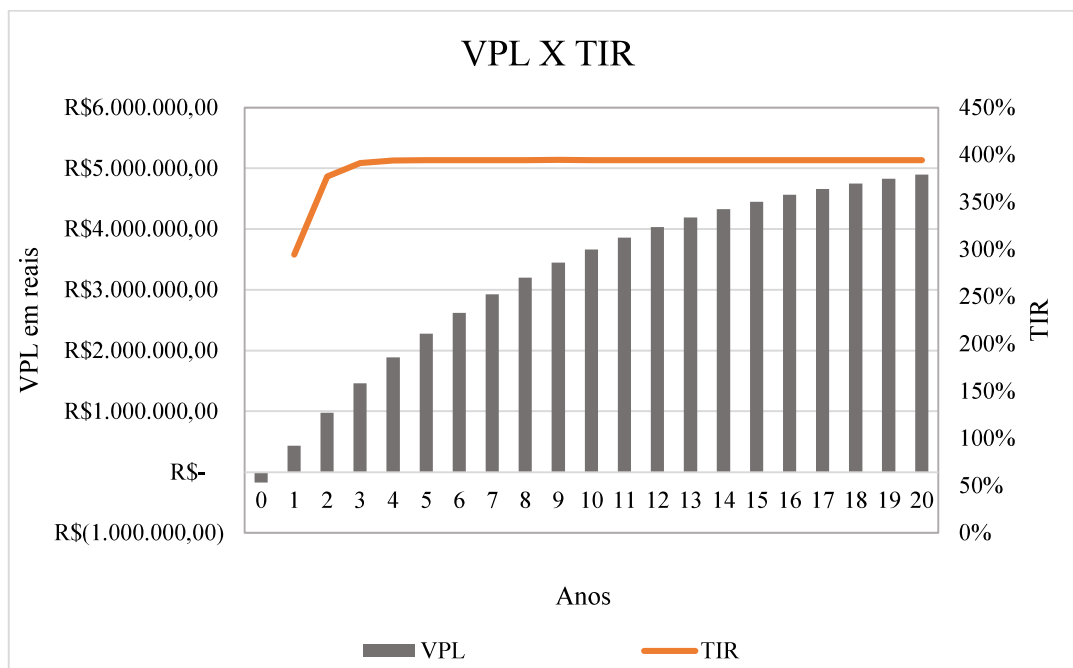


Figura 4.5—Estimativa para os valores de VPL e TIR calculados de acordo com análises anuais para os 20 anos de vida útil do sistema.

Tendo em vista que todos os parâmetros econômicos empregados na análise apresentaram resultados positivos, em busca de observar a lucratividade do sistema de aquecimento solar, calculou-se também a taxa de lucratividade, que nada mais é do que a soma de todos os valores presentes divididos pelo investimento inicial. O valor estimado foi de 29,46, o que significa que a cada R\$1,00 investido inicialmente, o sistema, ao longo de sua vida útil, trará um retorno de R\$29,46.

Ao confrontar os resultados obtidos neste trabalho, com resultados encontrados na literatura em pesquisas de mesma natureza, nota-se que foram obtidos resultados coerentes com as características do sistema de aquecimento solar de água analisado. A Tabela 4.5 mostra estas comparações.

Entre vários estudos científicos estudados e citados na revisão bibliográfica, os citados na Tabela 4.5 foram selecionados para comparação por conta da abordagem realizada e por apresentarem resultados com as mesmas características (volume diário, tempo de retorno do investimento, Etc.).

Tabela 4.5– Comparação dos resultados econômicos obtidos com a literatura.

Autor(es)	Resultados obtidos neste trabalho	HERRANDO & MARKIDES, 2016	YUAN <i>et al.</i> 2017	HUSSAIN <i>et al.</i>, 2019	HANG & ZHAO, 2012
Local	João Pessoa, Brasil	Londres, Reino Unido	Shandong, China	Paquistão	EUA
Finalidade	Aquecimento industrial	Água quente domiciliar	Água quente para alojamento estudantil	Aquecimento industrial	Água quente domiciliar
Volume diário	16000 L	150 L	360000 L	120000 L	
Energia	144,45 MWh/ano	1,0 MWh/ano		640,43 MWh/ano	
Retorno	5 meses	11,2 anos	7,6 anos (estimado)	3,5 anos	máximo 13 anos
Indicador de referência	0,009 dia/L	26,88 dia/L	0,0076 dia/L	0,01 dia/L	

Quando comparamos o retorno do investimento, é importante perceber que instalações localizadas em regiões de latitude menor (Brasil e Paquistão) apresentam um *Payback* menor, isso se dá por que essas regiões apresentam maiores índices solarimétricos e temperaturas médias maiores que as demais, no entanto, em todas as análises verificadas e expostas na Tabela 4.4, o sistema de aquecimento solar apresenta vantagens econômicas e ambientais, tanto para finalidade residencial quanto quando empregada em maior escala no caso do alojamento estudantil e em escala industrial.

Diante disto, os resultados obtidos neste trabalho se mostram satisfatórios, pois o caso estudado trata-se de uma aplicação em grande escala (volume industrial), localizado em uma região equatorial e que emprega tecnologia local. Todos estes fatores contribuem para que o SAS em questão apresente capacidade técnica de atender a demanda, assim como bons resultados econômicos e ambientais.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando que a viabilidade técnica de um sistema energético é um passo inicial, sugere-se que a etapa seguinte inclua pelo menos uma análise econômica. Mais recentemente, devido a preocupações ambientais com os efeitos das mudanças climáticas e pressões para reduzir os impactos ambientais associados às atividades, vem se acrescentando a análise ambiental como etapa adicional. Este trabalho avaliou a viabilidade econômica e ambiental de um sistema de aquecimento de água definido *a priori*, considerando como alternativa e este, um sistema convencional de aquecimento utilizando caldeira a gás.

Aplicou-se a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) como metodologia para uma avaliação comparativa entre as opções avaliadas, e considerada uma única categoria de impacto, o potencial de aquecimento global, expressa em kg CO₂-eq. Quando comparados os resultados, o sistema solar apresenta um impacto 194% menor que o sistema convencional. Isto ocorre porque não há consumo de combustíveis no sistema solar, enquanto que no sistema convencional, se utiliza um combustível fóssil (gás natural). Mesmo comparando os resultados de impactos para vidas úteis menores que 20 anos (5, 10 e 15 anos), o sistema solar apresenta resultados melhores, pois enquanto o sistema convencional tende a uma estabilização das emissões ao longo dos anos, o sistema solar tende a apresentar menores quantidades acumuladas de kg CO₂-eq kWh⁻¹.

Apesar do sistema solar apresentar melhores resultados ambientais como um todo, este apresenta um maior impacto na instalação, devido aos materiais empregados na

fabricação dos equipamentos. Quando observada a influência dos materiais que compõem os sistemas, o alumínio e o aço inox são os materiais que mais contribuem para as emissões. Esta análise é importante pois a partir dela pode-se buscar alternativas de materiais que mantenham os requisitos técnicos e que diminuam os impactos ambientais nesta fase.

Para análise econômica, foram considerados quatro critérios, e em todos o sistema solar apresentou melhores resultados. O fluxo de caixa referente ao investimento do sistema de aquecimento solar de água, foi realizado considerando como entrada a economia com combustível (gás natural) para abastecer o sistema convencional de aquecimento. O Valor presente Líquido (VPL) se apresentou positivo desde o primeiro ano, ou seja, de acordo com a análise do VPL, o sistema se mostrou não só viável, mas também atrativo. A análise econômica de acordo com o critério da Taxa Interna de Retorno (TIR) também apresentou resultados positivos. A TIR já classifica o sistema como viável para valores superiores a taxa de desconto considerada na análise (12%). O cálculo da TIR retornou um valor 25 vezes superior a mínima aceitável já no primeiro ano analisado. De acordo com a análise do *Payback*, o sistema de aquecimento solar retorna o investimento inicial em apenas 5 meses, ou seja, em apenas 5 meses de operação, o sistema solar terá economizado, em despesa com combustível, valor suficiente para se pagar. A partir de então, o sistema solar trará lucros com a economia de combustível. Segundo a taxa de lucratividade, a cada R\$1,00 investido inicialmente, o sistema retornará R\$29,46 de economia.

Diante de todos os pontos avaliados, o sistema de aquecimento solar de água mostrou-se vantajoso do ponto de vista ambiental e econômico. De acordo com tudo que foi abordado o investimento, além de viável, é atrativo, uma vez que, em comparação com o sistema convencional, apresenta um impacto ambiental bem menor, durante o período analisado, e proporciona economias significativas com combustível.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A energia solar térmica é considerada uma forma "limpa" de energia por não fazer uso de combustíveis fósseis durante sua operação, entretanto, ocorrem impactos ambientais durante seu ciclo de vida, então para trabalhos futuros sugere-se:

- Análise das propriedades de materiais potencialmente substitutos ao aço inox e ao alumínio e seu comportamento em equipamentos térmicos;

- Otimização dos processos de produção dos equipamentos que compõem o SAS, afim de minimizar impactos ambientais, sem percas das características técnicas necessárias;
- Estudo da contribuição atual da energia solar térmica na matriz energética brasileira e impacto social, econômico e ambiental do seu emprego em maior escala no Brasil;
- Analise de incentivos governamentais dados no Brasil e no mundo a investimentos em energia solar térmica e medidas necessárias.

REFERÊNCIAS

ALBERTI, J. *et al.* Life Cycle Assessment of a solar thermal system in Spain, eco-design alternatives and derived climate change scenarios at Spanish and Chinese National levels. **Sustainable Cities and Society**, v. 47, p. 101467, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670719300812>> Acesso em: 10 dez. 2020.

ALVES, I. M. **Avaliação energética e ambiental do ciclo de vida de um sistema de abastecimento de água**. 2018. 71 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/32590/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20Isaura%20Mac%C3%AAdo%20Alves.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2020.

ALUCCI, M. *Climaticus 4.2* (versão Beta). **Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética- FAUUSP**, 2011. Disponível em: <[www.fau.usp.br/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/Climaticus_2011\(beta\).xlsm](http://www.fau.usp.br/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/Climaticus_2011(beta).xlsm)>. Acesso em: 10 jun. 2020.

ARDENTE, F., BECCALI, G., CELLURA, M., BRANO, V. L. Life cycle assessment of a solar thermal collector. **Renewable Energy**, v. 30, n. 7, p. 1031-1054, 2005. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148104003714>> Acesso em: 10 nov. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro, 2014a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro, 2014b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14031: Gestão Ambiental - Avaliação de Desempenho Ambiental - Diretrizes. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Requisitos de projeto e instalação. Rio de Janeiro, 2020.

BARBOSA, R. R., CARVALHO, M., 2019, . A step by step design guide for a solar water heating system considering thermal losses. **Revista de Engenharia Térmica**, v. 18, n. 2, p. 26-37, 2019. Disponível em : <<https://revistas.ufpr.br/reterm/article/view/70784/39939>> Acesso em: 13 maio 2020.

BARBOSA, R., CARVALHO, M. Dimensionamento de um sistema de aquecimento solar de água para aplicações industriais. **ENGEVISTA**, v. 20, n. 2, p. 214-238, 2018. Disponível em: <<https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/9195>>. Acesso em: 13 maio 2020.

BLANK, L., TARQUIN, A. **Engenharia econômica**. 6. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2009.

BRASIL, Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**: promulgada em 5 de outubro de 1988. Brasília, Distrito Federal: Senado Federal.

BRASIL, **Balanço Energético Nacional 2019: Ano Base 2018**. MME. Rio de Janeiro: EPE, 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>> Acesso em 10 jan. 2020.

BRIGHAM, E. F., EHRHARDT, M. C. **Financial management: Theory & practice**. 13. ed. Cengage Learning, 2013.

BOSCH, **Orçamento do sistema convencional: Instalação e operação**, 2020.

CABEZA, L. F. *et al.* Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 394-416, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113005777>> Acesso em 12 nov. 2020.

CAMPOLINA, M. J., SIGRIST, C. S. L., MORIS, A. da S. Uma revisão de literatura sobre softwares utilizados em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida, **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 735-750, 2015. Disponível em: <[file:///C:/Users/rafar/Downloads/15494-87469-1-PB%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/rafar/Downloads/15494-87469-1-PB%20(1).pdf)>. Acesso em: 10 jul. 2020.

CARVALHO, M. *et al.* Synthesis of trigeneration systems: Sensitivity analyses and resilience. **The Scientific World Journal**, v. 2013, 2013. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/tswj/2013/604852/>> Acesso em: 10 jul. 2020.

CARVALHO, M., DELGADO, D. Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix. **LALCA - Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 1, n. 1, p. 64-85, 2017. Disponível em: <<http://lalca.acv.ibict.br/lalca/article/view/3779>> Acesso em: 05 ago. 2020.

CHIAVETTA, C., TINTI, F., BONOLI, A. Comparative life cycle assessment of renewable energy systems for heating and cooling. **Procedia Engineering**, p. 591-597, 2011.

COLE, S., PEREIRA, E. B. Atlas de Irradiação Solar do Brasil. **Brasília: LABSOLAR/INMET**, 1998 Disponível em:

<https://permacoletivo.files.wordpress.com/2008/05/atlas_de_irradiacao.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2020

COMODI, G., BEVILACQUA, M., CARESANA, F., PELAGALLI, L., VENELLA, P., PACIAROTTI, C. LCA analysis of renewable domestic hot water systems with. **Energy Procedia**, v. 61, p. 234-237, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214029269>> Acesso em: 10 ago. 2020.

CRUZ, T., SCHAEFFER, R., LUCENA, A. F., MELO, S., DUTRA, R. Solar water heating technical-economic potential in the household sector in Brazil. **Renewable Energy**, v. 146, p. 1618-1639, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811930919X>>. Acesso em: 20 de set. 2020.

DA FONTOURA, F. B., RABUSKE, R., FRIEDRICH, L. R. Análise da Viabilidade para Implantação de Energia Fotovoltaica com Utilização para Sombreamento de Estacionamento. **Estudo do CEPE**, p. 36-48, 2018. Disponível em: <<https://online.unisc.br/seer/index.php/cepe/article/view/9424>> Acesso em: 11 set. 2020.

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A., **Solar engineering of thermal processes**. New York: John Wiley & Sons, 2014.

DUMAN, A. C., GÜLER, Ö. Economic analysis of grid-connected residential rooftop PV systems in Turkey. **Renewable Energy**, v. 148, p. 697-711, 2020. Disponível em: <<https://ideas.repec.org/a/eee/renene/v148y2020icp697-711.html>>. Acesso em: 13 maio 2020.

ECOINVENT, **The ecoinvent database 3.6**, 2019. Disponível em: <<http://www.ecoinvent.org/>>. Acesso em 04 dez. 2019.

ELLENBECK, S., LILLIESTAM, J. How modelers construct energy costs: discursive elements in energy system and integrated assessment models. **Energy Research & Social Science**, v. 47, p. 69-77, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629618306546>> Acesso em: 07 nov. 2019.

ENDALE, A. Analysis of Status, Potential and Economic Significance of Solar Water Heating. **Renewable Energy**, v. 132, p. 1167-1176, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118310449>> Acesso em: 20 de set. 2020.

GIGLIO, T., SANTOS, V., LAMBERTS, R. Analyzing the impact of small solar water heating systems on peak demand and on emissions in the Brazilian context. **Renewable Energy**, v. 133, p. 1404-1413, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118310541>> Acesso em: 5 maio 2020

GAUTAM, A., CHAMOLI, S., KUMAR, A., SINGH, S. A review on technical improvements, economic feasibility and world scenario of solar water heating system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 541-562, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116305913>> Acesso em: 03 jan. 2020.

RAMLOW, B., NUSZ, B. **Solar Water Heating--Revised & Expanded Edition: A Comprehensive Guide to Solar Water and Space Heating Systems**. New Society Publishers, 2010.

JAMAR, A. *et al.* A review of water heating system for solar energy applications. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 76, p. 178-187, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S073519331630166X>> Acesso em: 27 set. 2020.

GREEN – PUC Minas. Relatório de ensaio CSP-128BF. **INMETRO**, 2003.

GREENING, B., AZAPAGIC, A. Domestic solar thermal water heating: A sustainable option for the UK?. **Renewable Energy**, v. 63, p. 23-36, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113004576>> Acesso em: 7 mar. 2020.

GUINÉE, J. B. Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards. **The international journal of life cycle assessment**, v. 6, n. 5, p. 255, 2001. Disponível em: <<https://search.proquest.com/openview/e45b059ceaaa10f911ccd36471a811c9/1?cbl=54409&pq-origsite=gscholar>> . Acesso em: 11 jan. 2020.

HANG, Y., QU, M., ZHAO, F. Economic and environmental life cycle analysis of solar hot water systems in the United States. **Energy and Buildings**, v. 45, p. 181-188, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.001>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

HARAMAINI, Q., SETIAWAN, A., DAMAR, A., ALI, C., ADHI, E. Economic Analysis of PV Distributed Generation Investment Based on Optimum Capacity for Power Losses Reducing. **Energy Procedia**, v. 156, p. 122-127, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/330495767_Economic_Analysis_of_PV_Distributed_Generation_Investment_Based_on_Optimum_Capacity_for_Power_Losses_Reducing> Acesso em: 13 maio 2020.

HUSSAIN, M. A., RASHID, M., KHAN, S., RAHIN, A. Techno-Economic Analysis of Solar Thermal Water Heaters in Pakistan. **Sukkur IBA University**, v. 2, p. 36-46, 2019. Disponível em: <<http://sjcmss.iba-suk.edu.pk:8089/SIBAJournals/index.php/sjet/article/view/457>> Acesso em: 20 de set. 2020.

Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. **Avaliação de Ciclo de Vida**, 2020. Disponível em: <<http://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/>>. Acesso em: 10 Abr. 2020. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), **Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto protocol**, 2013. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/>. Acesso em: 18 Nov. 2019.

KALOGIROU, A. S. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. 2. ed. Elsevier Inc: Waltham, 2014

KUMAR, L., HASANUZZAMAN, M., RAHIM, N. A. Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review. **Energy Conversion and Management**, v. 195, p. 885-908, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419306363>> Acesso em: 20 de set. 2020

KURUP, P., TURCHI, C. Potential for solar industrial process heat in the United States: A look at California. In: AIP Conference Proceedings, v. 1734, p. 110001, 2015. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4949198>> Acesso em: 13 maio 2020.

KYLILI, A., FOKAIDES, P. A., IOANNIDES, A., KALOGIROU, S. Environmental assessment of solar thermal system for the industrial sector. **Journal of Cleaner Production**. v. 176, p. 99-109, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617331098>> Acesso em: 01 abr. 2020.

DE LABORDERIE, A., PUECH, C., ADRA, N., BLANC, I., BELOIN-SAINT-PIERRE, D., 2011, Environmental Impacts of Solar Thermal Systems with Life Cycle Assessment. In: **World Renewable Energy Congress**, Linköping University Electronic Press, Linköpings universitet, 2011. p. 3678-3685 - ISBN 978-91-7393-070-3.

LEGISLAÇÃO DO MINISTÉRIO DO TRABALHO. **Norma Regulamentadora NR-13**, 1995.

LIU, W. *et al.* Environmental life cycle assessment and techno-economic analysis of domestic hot water systems in China. **Energy Conversion and Management**, v. 199, p. 111943, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041930946X>> Acesso em: 07 set. 2020.

MAHLIA, T. M., RAZAR, H. A., NURSAHIDA, M. A. Life cycle cost analysis and payback period of lighting retrofit at the University of Malaya. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 2, p. 1125-1132, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110003618>> Acesso em: 15 ago. 2020.

MANGLA, S. K. *et al.* A step to clean energy-Sustainability in energy system management in an emerging economy context. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, p. 118462, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619333323>> Acesso em: 12 fev. 2020.

MARTINOPOULOS, G., TSILINGIRIDIS, G., KYRIAKIS, N. Identification of the environmental impact from the use of different materials in domestic solar hot water systems. **Applied Energy**, v. 202, p. 545-555, 2013.

MASRUROH, N. A., LI, B., KLEMES, J. Life cycle analysis of a solar thermal system with thermochemical storage process. **Renewable Energy**, v. 31, n. 4, p. 537-548, 2006. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148105000728> > Acesso em: 11 fev. 2020.

MENDES, N. C., BUENO, C., OMETTO, A. R., 2016, Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: Revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, p. 160-175, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-65132015005010112&script=sci_arttext> Acesso em: 10 fev. 2020.

NITKIEWICZ, A., SEKRET, R. Comparison of LCA results of low temperature heat plant using electric heat pump, absorption heat pump and gas-fired boiler. **Energy Conversion and Management**, v. 87, pp. 647–652, 2014.

ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). **Plano da Operação Energética**, Sumário Executivo 2019, 2019. Disponível em: http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/PEN_Executivo_2019-2023.pdf. Acesso em: 04 dez. 2019.

PBGÁS. **Evolução tarifária**, João Pessoa, 2020. Disponível em: < http://www.pbgas.com.br/?page_id=1477 >. Acesso em: 10 set. 2020.

PEREIRA, L. G. Análise multiescala multicritério do desempenho energético-ambiental brasileiro. Campinas, São Paulo, 2012. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/256253/1/Pereira_LucasGoncalves_D.pdf> Acesso em: 06 maio 2020.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar**. 2 ed. São José dos Campos: INPE, 80 f. 2017. Disponível em: < https://issuu.com/jorgeantoniovillarale/docs/atlas_brasileiro_energia_solar_2a_e >. Acesso em: 21 mar. 2020.

PROCOBRE. **Qualidade em Instalação de Energia Solar: Boas Práticas**. 44 f., 2019. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/183860/mod_resource/content/2/Manual-de-Boas-Praticas-Aquecimento-Solar.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2020.

RadiaSol 2. **Laboratório de Energia Solar**. UFRGS: Porto Alegre, 2010. Disponível em <<http://radiasol-c-program-files-x86-radiasol-2.updatestar.com/pt>> Acesso em: 12 jul. 2020.

RATNER, S., GOMONOV, K., REVINOVA, S., LAZANYUK, I. Energy Saving Potential of Industrial Solar Collectors in Southern Regions of Russia: The Case of Krasnodar Region. **Energies**, v. 13, n. 4, p. 885, 2020. Disponível em: < <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/4/885> >. Acesso em: 20 de set. 2020.

RODRIGUES, D. (Coord). Introdução ao Sistema de Aquecimento Solar. Ekos Brasil e Vitae Civilis: São Paulo, 132 f., 2010. Disponível em:

<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/60551/mod_resource/content/1/Apostila_Aquecimento_Solar.pdf>. Acesso em: 30 de ago. 2020.

RODRIGUES, A. M., ZEVIANI, C. H., REBELATO, M. G., BORGES, L. Avaliação de desempenho ambiental industrial: elaboração de um referencial metodológico. **Revista Produção Online**, v. 15, n. 1, p. 101-134, 2015. Disponível em: <<https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/1719>> . Acesso em: 6 maio 2020.

SIMAPRO. **Software SimaPro v.9**, 2020.

SHARMA, A. K., SHARMA, C., MULLICK, S. C., KANDPAL, T. C. GHG mitigation potential of solar industrial process heating in producing cotton based textiles in India. **Journal of cleaner production**, v. 145, p. 74-84, 2017a. Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0959652616322260?token=0D13A6A82523DA3209741F3802BCECA9CFF0AC269040CA8ACE5B9441B73BEC6C6C230EDDE9EDFFFD4C96F245AA1DC>> Acesso em: 13 maio 2020.

SHARMA, A. K., SHARMA, C., MULLICK, S. C., KANDPAL, T. C. Solar industrial process heating: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 124-137, 2017b . Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1364032117305610?token=E8DAE3D7A9B976A32D889E5F33DC5190D480D8A2A187F1899384F5D137B20633AABD142EB635639E10C3319598F689BC>> Acesso em: 13 maio 2020.

SOLARTECH. Informações Técnicas do Coletor Solar S-81 e do Boiler 2000l. João Pessoa, 2016.

SOLARTECH. Composição material do Coletor Solar S-81 e do Boiler 2000l. João Pessoa, 2019.

SVIECH, V., MONTOVAN, E. A. Análise de investimentos: controvérsias na utilização da TIR e VPL na comparação de projetos. **Percursos**, v. 1, p. 270-298, 2013

TIBA, C. (Coord.). Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de dados terrestres. Recife: Editora Universitária da UFPE, 111 p., 2020. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf> Acesso em: 24 ago. 2020.

URTADO, E. S., SANTOS, V. d., QUINTANHOS, P. C., OLIVEIRA, E. A. Aplicação do método do valor presente líquido (VPL) na análise da viabilidade econômica de projetos na indústria metal mecânica: um estudo de caso. **ECONTRÓ LATINO AMERICANO DE PÓS GRADUAÇÃO**, v. 9, p. 1-4, 2013. Disponível em: <http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2009/anais/arquivos/0732_0960_01.pdf>. Acesso em: 02 maio 2020.

WANG, J., JING, Y.-Y., ZHANG, C.-F., ZHA, J.-H. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision making. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 13, n. 9, p. 2263-2278, 2009. Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1364032109001166?token=852FC3C921508FE>>

7CBD39F442B95AC308B5AE88DF50CB4F13E6B0FDFC71BDF73A1DF36891C0A23B6C6AB9340DC587BF4> Acesso em: 04 maio 2020.

WEISS, W., SPORK-DUR, M. Solar Heat Worldwide. International Energy Agency. Gleisdorf: AEE - Institute for Sustainable Technologies, 2019. Disponível em: <<https://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2019.pdf>> Acesso em: 13 maio 2020.

WILLERS, C. D., RODRIGUES, L. B., SILVA, C. A. Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais. **Production**, v. 23, n. 2, p. 436-447, 2013.

WITT, T., DUMEIER, M., GELDERMANN, J. Combining scenario planning, energy system analysis, and multi-criteria analysis to develop and evaluate energy scenarios. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, p. 118414, 2020.

YILMAZ, V., CAN, Y. Impact of knowledge, concern and awareness about global warming and global climatic change on environmental behavior. **Environment, Development and Sustainability**, pp. 1-16, 2019.

YUAN, H., *et al.* Economic and environmental benefit analysis of energy performance contracting for a solar hot water system in Chinese universities. In: **Advances in Materials Sciences, Energy Technology and Environmental Engineering: Proceedings of the International Conference on Materials Science, Energy Technology and Environmental Engineering, MSETEE 2016, Zhuhai, China, May 28-29, 2016**. CRC Press, 2017. p. 281. Disponível em: <<https://search.proquest.com/docview/2116605198?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true>> Acesso em: 20 de set. 2020.

ZAMBRANA-VASQUEZ, D. *et al.* Environmental assessment of domestic solar hot water systems: a case study in residential and hotel buildings. **Journal of Cleaner Production**, v. 88, p. 29-42, 2015.

ZHANG, R. *et al.*, Techno-economic feasibility of solar water heating system: Overview and meta-analysis. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 30, p. 164-173, 2018.

ZIS, T., ANGELOUDIS, P., BELL, M. G., PSARAFTIS, H. N. Payback Period for Emissions Abatement Alternatives: Role of Regulation and Fuel Prices. **Transportation Research Record**, v. 2549, n.1, p. 37-44, 2016.