

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS PATO BRANCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANDRESSA MILANEZ**

**ESTUDO DE CASO: POTENCIAIS IMPACTOS AMBIENTAIS DA  
PRODUÇÃO DE UMA PLACA SOLAR TÉRMICA POLIMÉRICA COM BASE  
NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

**PATO BRANCO**

**2021**

**ANDRESSA MILANEZ**

**ESTUDO DE CASO: POTENCIAIS IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE  
UMA PLACA SOLAR TÉRMICA POLIMÉRICA COM BASE NA AVALIAÇÃO DO  
CICLO DE VIDA**

**CASE STUDY: POTENTIAL ENVIRONMENTAL IMPACTS OF THE PRODUCTION  
OF A POLYMER THERMAL SOLAR PLATE BASED ON LIFE CYCLE  
ASSESSMENT**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Ney Lyzandro Tabalipa.

Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Geocris Rodrigues dos Santos.

**PATO BRANCO**

**2021**



Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho para fins não comerciais e, embora os novos trabalhos tenham de lhe atribuir o devido crédito e não possam ser usados para fins comerciais, os usuários não têm de licenciar esses trabalhos derivados sob os mesmos termos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



ANDRESSA MILANEZ

**ESTUDO DE CASO: POTENCIAIS IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE UMA PLACA SOLAR  
TÉRMICA POLIMÉRICA COM BASE NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Meio Ambiente.

Data de aprovação: 17 de Novembro de 2021

Prof Ney Lyzandro Tabalipa, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Ana Carolina Badalotti Passuello, Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Ufrgs)

Prof.a Cassia Maria Lie Ugaya, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Geocris Rodrigues Dos Santos, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 14/12/2021.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeira gostaria de agradecer ao corpo docente da UTFPR, por me instruir e compartilhar conhecimentos tão importantes para a minha caminhada acadêmica. Em especial ao meu orientador Prof. Dr. Ney Lyzandro Tabalipa e minha incrível co-orientadora Geocris Rodris dos Santos, também tenho muito a agradecer a banca examinadora Prof. Dr. Cássia Maria Lie Ugaya e a Prof. Dr. Ana Carolina Badalotti Passuello pelas contribuições deste trabalho.

Aos meus pais Audrey e Marines, e irmão Alessandro que nunca mediram esforços para me apoiar física e emocionalmente durante toda a minha vida, incentivando, guiando e estando presente em todas etapas. Ao meu marido Lucas, por todo amor, companheirismo e paciência em todos esses anos, que foi essencial para o meu desenvolvimento, você é parte fundamental dessa conquista.

Enfim, a toda rede de apoio que tive durante esses anos de dedicação acadêmica, todos amigos que me acolheram em suas casas e que viraram minha família em Pato Branco, essa conquista também é de vocês.

## RESUMO

A utilização de energia elétrica no Brasil é provida em sua maioria por meio de hidrelétricas. Com o aumento da necessidade energética e a precariedade cada vez maior dos recursos naturais explorados, relacionada à amplitude ambiental, tem-se a necessidade de investigar soluções com fontes de energias renováveis. A irradiação solar é uma das mais importantes e abundante fonte de energia renovável, e uma das opções para substituir a energia hidrelétrica. Nesse contexto, o estudo dos impactos ambientais relacionados à sua implantação torna-se relevante para a garantia de um sistema limpo e sustentável. Dessa forma, essa pesquisa tem como objetivo avaliar os potenciais impactos ambientais causados pela produção de uma placa solar térmica, considerando os materiais que a compõe, bem como o processo para a sua fabricação, em uma fábrica localizada na cidade de Pato Branco – PR. A placa é composta por material polimérico, destinada a uso residencial e com capacidade de aquecer 62,5 litros de água a 60°C durante o ciclo solar local, associados ao ciclo de vida, identificando as categorias de impacto com contribuição mais significativa nesse sistema. A partir deste objetivo, desenvolveu-se um estudo sobre o processo produtivo das placas solares, fabricadas pela empresa Sustentabil Energias LTDA em Pato Branco, PR, verificando a contribuição de cada um dos processos e insumos, na decorrência de impactos ambientais. Foi utilizada a técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), por meio do software SimaPro® com o banco de dados ecoinvent®, que avalia as entradas e saídas de todo o sistema, nesse caso considerando o processo produtivo do produto (*cradle to gate*), verificando qual componente causa maior impacto e em qual categoria se encaixa. Utilizou-se a metodologia do CML. Os resultados encontrados indicam que o fluxo com potencial impacto ambiental mais significativo, ou seja, com maior impacto é o módulo de policarbonato. Esse resultado reforça a bibliografia, de que o principal componente da placa da placa solar, independentemente de ser uma placa solar térmica constituída de material convencional ou alternativo, é o mais impactante, fato que não inviabiliza sua utilização.

**Palavras-Chave:** Placa solar térmica, Impactos ambientais, Avaliação do Ciclo de Vida.

## ABSTRACT

The use of electric energy in Brazil is provided in mostly through hydroelectric. With the increase of energy demand and the growing precariousness of the natural resources explored, related to an environmental amplitude, is necessary to investigate solutions with renewable energy. The solar irradiation is one of the most important and plentiful renewable energy sources and one of the options to replace the hydroelectric. In this context, the study of the environment impacts related to your deployment becomes relevant to ensure a clean and sustainable system. Thus, the study aims to characterize the potential environmental impacts caused by the production of a thermal solar panel, produced in the city of Pato Branco - PR, composed of polymeric material, intended for residential use and capable of heating 62.5 liters of water at 60°C during the local solar cycle, associated with the life cycle, identifying the impact categories with the most significant contribution in this system. From this objective, a study was developed on the production process of solar panels, manufactured by the company Sustentabil Energias LTDA in Pato Branco, PR, verifying the contribution of each of the processes and inputs, as a result of environmental impacts. For this determination will be use the Life Cycle Assessment (LCA) technique, through Simapro® software that uses the ecoinvent® database, which evaluates the inputs and outputs of the entire system, in this case considering the product's production process (cradle to gate), checking which component has the greatest impact and which category it fits into The CML methodology was used. The results found indicate that the flux with the most significant potential environmental impact, that is, with the greatest impact, is the polycarbonate module. This result reinforces the bibliography that the main component of the solar plate, regardless of whether it is a thermal solar plate made of conventional or alternative material is the most impactful, a fact that does not make its use unfeasible.

**Keywords:** Solar thermal plate, Environmental Impacts, Life Cycle Assessment (LCA).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Fluxograma das aplicações da Energia Solar .....	15
Figura 2 Esquema de um coletor solar plano .....	17
Figura 3 Princípio de funcionamento da placa solar térmica polimérica.....	18
Figura 4 Localização da cidade de Pato Branco no estado do Paraná e mapa urbano do município.....	35
Figura 5 Componentes da placa solar térmica em corte .....	37
Figura 6 Identificação da função e unidade funcional .....	37
Figura 7 Fluxos de entrada e saída do sistema.....	39
Figura 8 Corte do comprimento dos Tubos de PVC.....	40
Figura 9 Abertura para encaixe do módulo de policarbonato .....	40
Figura 10 Módulo de Policarbonato fixado nos tubos PVC .....	41
Figura 11 Colagem do isolante térmico na placa de policarbonato .....	41
Figura 12 Pintura das placas.....	42
Figura 13 Fluxograma de entradas e saídas do sistema.....	43
Figura 14 Exemplo de placa solar térmica instalada .....	44
Figura 15 Gráfico da participação (%) de cada entrada na AICV para o módulo do CML .....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Referência Bibliográfica.....	22
Tabela 2 Método de AICV utilizado (adaptado de CEN, 2019) .....	27
Tabela 3 Métodos de AICV disponíveis no Simapro® 9.1.....	32
Tabela 4 Entradas para o inventário do ciclo de vida.....	45
Tabela 5 Dado das ENTRADAS da produção de uma placa solar térmica polimérica .....	52
Tabela 6 Dado das SAÍDAS da produção de uma placa solar térmica polimérica ....	53
Tabela 7 AICV de uma placa solar térmica polimérica.....	54



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCV- Associação Brasileira de Ciclo de Vida  
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ACV - Avaliação do Ciclo de Vida  
AICV - Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida  
AKATU - Consumo Consciente para um Futuro Sustentável  
CBCS - Conselho Brasileiro da Construção Sustentável  
CEBDS - Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável  
CML – Institute of Environmental Sciences  
CONMETRO - Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade  
EC-JRC - Joint Research Centre of the European Commission  
EDIP - Environmental Design of Industrial Products  
EPS - Environmental Priority Strategies  
GANAP - Grupo de Apoio à Normalização Ambiental  
GEE – Gases de efeito estufa  
IBICT - Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia  
ICV - Inventário de Ciclo de Vida  
ILCD - Handbook International Reference Life Cycle Data System  
INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia  
IPCC - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas  
IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas  
ISO -International Organization for Standardization  
LALCA - Latino Americana em Avaliação do Ciclo de Vida  
MRI - Midwest Reserach Institute  
MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia  
MEEuP - Methodology study for Eco-design of Energy-using Products  
PBACV - Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida  
REPA - Resource and Environmental Profile Analysis  
SETAC - Sociedade Internacional para a Química e Toxicologia Ambiental  
SICV - Brasil Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida  
UNEP - United Nations Environment Programme

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1	OBJETIVOS .....	13
1.1.1	Objetivo geral .....	13
1.1.2	Objetivos específicos .....	13
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO</b> .....	<b>14</b>
2.1	ENERGIA SOLAR .....	14
2.1.1	Placas solares térmicas .....	16
2.2	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE PLACAS SOLARES TÉRMICAS .....	19
2.3	MÉTODO DE ANÁLISE .....	26
2.4	FERRAMENTAS QUE AUXILIAM A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA .....	31
2.4.1	ecoinvent® .....	31
2.4.2	Simapro® .....	32
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>34</b>
3.1	OBJETIVO E ESCOPO .....	34
3.1.1	Área de estudo: Pato Branco, Paraná .....	35
3.1.2	Caracterização da Placa Solar Térmica Polimérica .....	36
3.1.3	Definição da função e unidade funcional .....	37
3.1.4	Definição do sistema de produto .....	38
3.2	VISITA À FÁBRICA E APLICAÇÃO DO QUESTIONÁRIO .....	39
3.3	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV) .....	44
3.3.1	Módulos do ecoinvent® .....	46
3.3.2	Estruturação do inventário do ciclo de vida .....	51
3.4	ANÁLISE DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA (AICV) .....	54
3.4.1	Métodos de AICV .....	54
3.5	DISCUSSÕES .....	59
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>63</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>64</b>
	<b>ANEXO A</b> .....	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Ministério de Minas e Energias, o Brasil tem sua demanda de energia elétrica suprida principalmente por meio de hidroelétricas (MME, 2020). Entretanto, apesar do grande potencial hídrico brasileiro, a exploração da matriz hidroelétrica está em declínio devido aos danos ambientais causados pela implantação da mesma e estiagens recorrentes.

Diante do crescimento populacional e econômico, percebe-se o aumento na quantidade de energia consumida, bem como o seu desperdício e utilização ineficaz (RÜTHER, 2010). Com o aumento da demanda energética e a possibilidade da redução de exploração dos combustíveis fósseis, buscando a preservação ambiental, tem-se a necessidade de investimentos no desenvolvimento tecnológico que permita a utilização de forma eficiente de fontes de energias renováveis (MARTINS; PEREIRA, 2011).

O emprego de energia solar como fonte alternativa energética é impulsionado pela busca de fontes renováveis e ecológicas (tecnologia verde), soluções que visam o menor impacto ambiental (CECONI, et al., 2010). A radiação solar é a fonte energética utilizada em muitos processos físico-químicos e biológicos, sendo uma das mais importantes fontes de energia renovável, podendo ser transformada em calor ou corrente elétrica (BENKACIALI; HADDADI; KHELLAF, 2018).

O Brasil é um país tropical com grande potencial de captação da energia solar na forma térmica ou fotovoltaica. Entretanto, em comparação com países desenvolvidos, como a China, Estados Unidos e Alemanha, sua utilização ainda é pequena, devido, principalmente, aos custos de implantação desses sistemas solares (CARDOSO; CAMPOS, 2017).

Segundo Vasconcelos e Limberger (2012), o uso residencial de energia solar térmica é muito baixo, e cerca de 0,4% da população do Brasil utiliza essa tecnologia para aquecer a água do banho, que é uma das maiores fontes de gastos energéticos residencial. Entretanto, de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2026 – estima-se que até 2026 a capacidade instalada de geração solar chegue a 13GW.

A utilização de placas solares térmicas é uma forma de substituição parcial da energia elétrica, utilizada para esquentar a água em equipamentos que gastam muita

energia em uma residência, como chuveiros e torneiras elétricas, ou em uso externo, como aquecimento de água em piscinas. Para garantir que essa tecnologia seja limpa e com baixo impacto ambiental deve ser investigado seu ciclo de vida.

Existem várias abordagens quanto à análise da sustentabilidade da geração de eletricidade, uma delas é a perspectiva dos impactos e efeitos que o uso destas causam no meio ambiente. A utilização de fontes não renováveis de geração de energia contribui na escala de emissão de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> em escala local e gases de efeito estufa (denominado de GEE) em escala global (GAGNON, 2002); (TURCONI et al, 2013). Esses gases causam mudanças climáticas, dentre elas pode-se citar a intensificação das temperaturas no verão, secas, ventos, furacões, além de serem os principais causadores de chuva ácida (GAGNON, 2002).

Nesse contexto, para o uso consciente de tecnologias solares é necessária a investigação da validade ambiental, ou seja, o impacto potencial causado pelo uso dessas tecnologias que substitui parcialmente ou totalmente o uso da energia hidroelétrica, servindo como incentivo para a maior utilização dessa tecnologia em residências e indústrias. Essas tecnologias visam apresentar um desenvolvimento e produção baseados no pilar da sustentabilidade, buscando sempre a inovação.

Exposto as motivações, este trabalho propõe a verificação dos potenciais impactos ambientais associados à produção de uma placa solar térmica composta por material polimérica, fabricada na cidade de Pato Branco, PR. Para cumprir tal motivação foi utilizada a técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

De acordo com Frischknecht et al. (2015), a ACV de um produto ou processo, quantifica e qualifica os fluxos de matéria e energia, verificando os impactos ambientais associados a esses processos. Essa técnica permite identificar qual etapa do ciclo de vida é mais representativa no impacto final. Com essa informação é possível desenvolver melhorias para o processo como um todo, e no caso deste estudo, verificar qual componente ou parte do processo causa maior impacto potencial.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar os potenciais impactos ambientais causados por uma placa solar térmica, considerando os materiais que a compõe, bem como o processo para a sua fabricação, em uma fábrica localizada na cidade de Pato Branco – PR. A placa é composta por material polimérico, destinada a uso residencial e com capacidade de aquecer 62,5 litros de água a 60°C durante o ciclo solar local, associados ao ciclo de vida, identificando as categorias de impacto com contribuição mais significativa nesse sistema.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Mediante o objetivo geral desta pesquisa, delimitou-se os objetivos específicos:

- Identificar quais são os materiais, componentes da placa solar térmica do estudo de caso, que potencialmente causam mais impactos ambientais;
- Identificar os pontos de melhorias que podem ser sugeridos para a produção da placa solar, seja em materiais ou processo de fabricação.

Ressalta-se as limitações desta pesquisa. Devido ao acesso restrito às informações das origens dos materiais, esse estudo foi delimitado ao fluxo de entradas e saídas apenas do sistema de produção da placa solar térmica em análise, não averiguando a placa em operação ou descarte.

Outro ponto a se destacar é o fechamento da fábrica analisada, fato que restringiu análises adicionais e a contabilização de descarte de materiais. Além disso, para a análise nesta pesquisa não foi avaliada o desempenho da placa nos períodos do ano em que o índice de radiação solar não é suficiente para aquecer a água, adicionado às restrições devido ao local de instalação, declividade e inclinação solar, que foram estimados.

Ponderando às limitações, essa pesquisa buscou atender seu objetivo, aliando a técnica proposta com a motivação de associar o uso dessa tecnologia constituída de materiais não convencionais a um uso sustentável.

## 2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

### 2.1 ENERGIA SOLAR

A preocupação com os danos causados ao meio ambiente se tornam fator relevante na tomada de decisão relacionado a todas as grandes preocupações nacionais, como geração de energia, abastecimento de água, entre outros. Essa preocupação torna o desenvolvimento de leis ambientais imprescindíveis, restringindo a emissão de poluentes e a exploração irracional de recursos não renováveis, incentivando a implantação de tecnologias sustentáveis de produção de energia.

Na celebração do Acordo de Paris, na Cop 21 (2005), o Brasil se comprometeu a redução das emissões de gases efeito estufa, em 2025, 37% e 43% até 2030 (NASCIMENTO, 2017). O uso de energias renováveis está diretamente ligado à busca de redução desses gases, desta forma, percebe-se a utilização da energia solar como fonte alternativa e limpa de produção de energia elétrica (PEREIRA, 2011).

Dos recursos energéticos disponíveis para captação, a energia solar é a mais abundante, considerando que a taxa de radiação solar interceptada pelo planeta Terra é superior a 10.000 vezes a taxa de utilização de energia da humanidade (IPCC, 2011).

Considerada uma energia renovável e sustentável, a energia solar, derivada do sol na forma de radiação solar e sua utilização pode acontecer em pequena escala. Pode ser instalada em lugares remotos e de difícil acesso, e também em lugares áridos aproveitando a máxima solar (PEREIRA, MENDES, 2018).

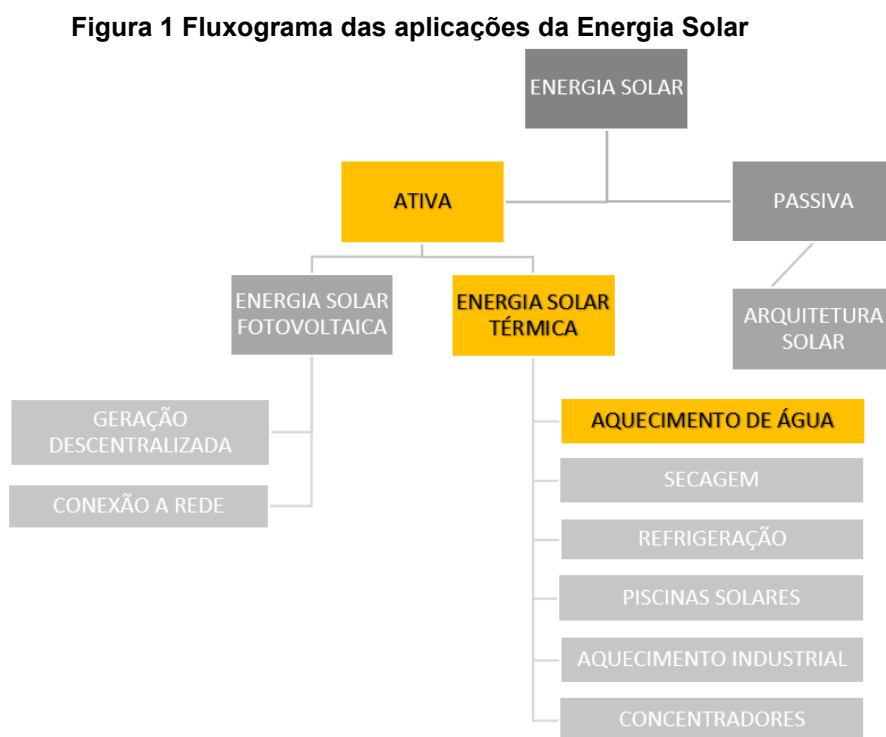
Ainda segundo Pereira e Mendes (2018), por ser vinculada a concepção de energia completamente limpa, sucedeu a expansão da exploração da energia solar como fonte de energia elétrica e térmica.

Apesar da energia solar em si ser uma fonte comprovadamente limpa e renovável, os métodos de coleta e transformação da energia solar em energia elétrica ou térmica não são necessariamente uma forma comprovada de tecnologia limpa, visto que para sua coleta são necessários módulos solares (placas) compostas por diversos materiais e compostos químicos, os quais necessitam de investigação de

todos os processos envolvidos em sua fabricação, incluindo estudo da sua vida útil e descarte final para comprovação.

O principal componente de um sistema de captação solar são os coletores solares, que possibilitam a conversão da radiação solar, por meio da transferência do fluxo energético resultante da radiação incidente para o fluxo de fluido que circula no interior do mesmo.

Por meio do fluxograma apresentado abaixo (Figura 1), percebe-se que existem dois grupos para aplicação prática da energia solar separando-os em categorias de: energia solar ativa e passiva.



Fonte: adaptado de Pereira et al., 2003.

A arquitetura solar, que resume a energia solar passiva, representa o planejamento arquitetônico de uma edificação, visando a eficiência energética. Já a energia solar ativa relaciona a forma direta da conversão da radiação solar em energia elétrica ou térmica, por meio de sistemas fotovoltaicos ou térmicos (PEREIRA et al, 2003).

Visto que o foco dessa pesquisa é a fabricação e os impactos potenciais referentes a uma placa solar para energia térmica, o próximo item é dedicado a esse meio de conversão de radiação solar.

### 2.1.1 Placas solares térmicas

As placas solares térmicas, que são o foco deste estudo, funcionam de forma ativa quando a energia solar é convertida diretamente em energia térmica. Essa conversão é feita a partir da absorção da radiação solar e na transferência dessa energia, em forma de calor, para o fluido que irá receber a energia útil. A capacidade de absorção das placas está relacionada a sua natureza, ângulo de incidência e cor do revestimento, normalmente cor preta.

Para que um coletor solar seja considerado eficiente ele deve absorver a radiação solar incidente, convertendo-a em energia térmica e entregá-la ao sistema com o mínimo de perdas possível (SUMAN et al., 2015).

Existem várias aplicações para placas solares térmicas e são divididas em categorias associadas ao uso final do fluido térmico (água ou ar), sendo divididas em processos de baixa, média e alta temperatura (PEREIRA et al, 2003; IPCC, 2011).

As aplicações para baixas temperaturas são de fins sanitários (foco deste estudo), aquecimento de piscinas ou pré-aquecimento e aquecimento do ar. Já a média temperatura é utilizada para refrigeração ou aquecimento industrial, por meio de coletores especiais concentrados. As altas temperaturas são utilizadas na geração de energia elétrica, também conhecidas como energia solar térmica concentrada ou Heliotérmica (PEREIRA et al, 2003).

De acordo com o *Solar Heat Worldwide* (SHC-IEA, 2015), os coletores são classificados de acordo com a sua finalidade, como: coletores planos, tubo a vácuo e coletor de ar ou aberto.

Os mais utilizados no aquecimento de água são o tubo a vácuo, que é mais eficiente e mais utilizado em lugares com níveis de irradiação mais baixos, ou seja, lugares com estação do inverno bem definidas, como por exemplo o sul do Brasil, e o coletor plano fechado. Já os coletores abertos são destinados principalmente para o aquecimento de piscinas, os coletores de ar para aquecimento do ar e os concentradores solares para geração de energia elétrica (PROCOBRE, 2009).

O escopo desta dissertação aborda a aplicação da energia solar térmica utilizando uma placa solar com sistema de plano fechado, constituído de material polimérico (não convencional).

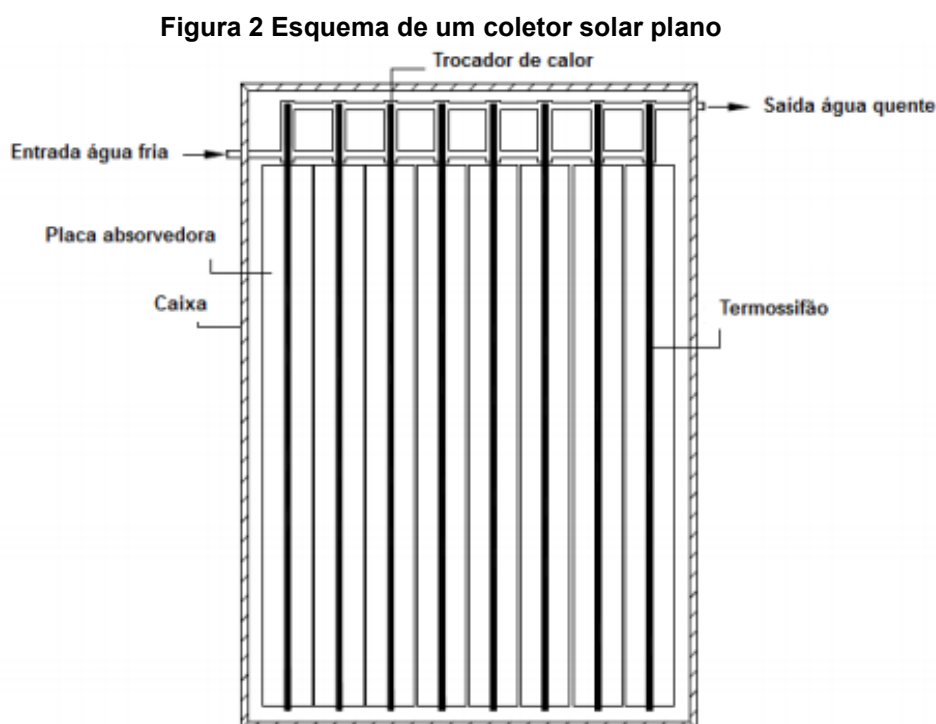
Esse coletor solar plano funciona da mesma forma que um coletor solar convencional, atuando por regime de termossifão ou bombeamento, este último



destinado à utilização para grandes volumes de água a ser aquecida ou quando os coletores estão localizados acima do nível do reservatório. Dentre os modelos e tipos de coletores, a placa coletora é a mais simples e pode ser constituída de variados materiais (KIM et al., 2016).

As placas coletoras mais simples são sem cobertura de vidro e suas placas são pintadas de tinta preta fosca para aumentar a absorção de energia solar. A ausência de uma cobertura transparente na superfície do coletor, diminui a atuação do coletor em dias de ventos fortes, porém auxilia na não degradação do material devido às altas temperaturas. Uma desvantagem a ser pontuada, é que geralmente esses materiais não convencionais possuem menor resistência ao choque que as placas com cobertura de vidro, esse é um ponto importante a ser considerado se as placas forem instaladas em lugares com chance de chuva de granizo, que provavelmente danificará as placas, causando maior manutenção (CHEN et al., 2015).

Os coletores solares de placa plana geralmente são compostos por tubos que conduzem o fluido da entrada até a saída da placa, como mostrado na Figura 2:



Fonte: Adaptado de AZAD, 2008.

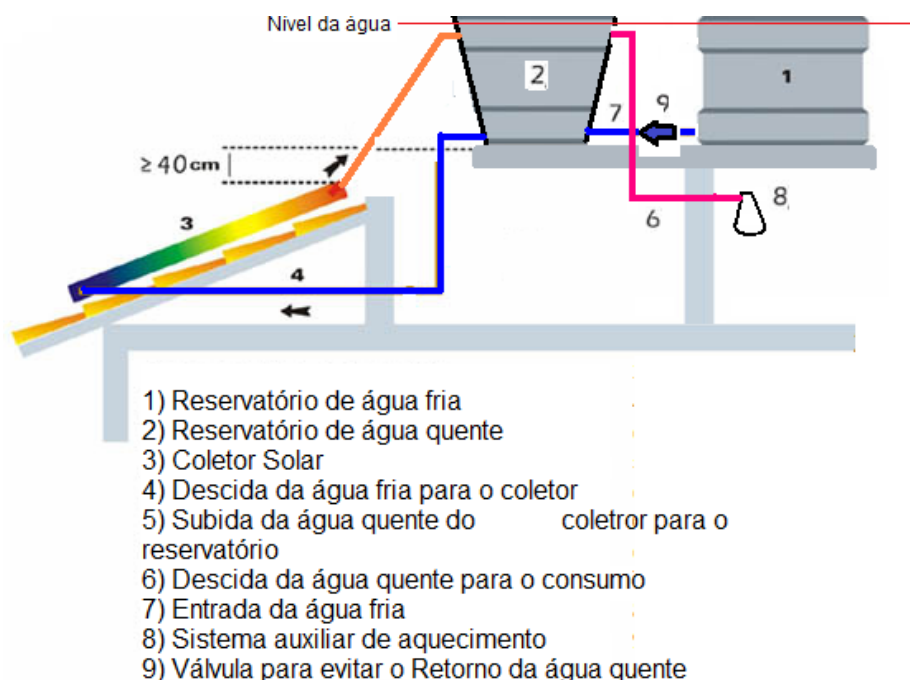
De acordo com o manual feito pelo fabricante das placas estudadas nesta pesquisa, o sistema de funcionamento da placa solar térmica polimérica de plano

fechado é baseado no efeito estufa formado dentro do coletor que induz a água dentro do coletor a percorrer pelo módulo de policarbonato. O calor formado na superfície dos coletores é absorvido pela água que está dentro deles. Funciona absorvendo a energia da radiação solar (em especial a faixa do infravermelho) transformando em energia térmica (calor), da mesma forma que os aquecedores tradicionais.

O calor na superfície preta dos coletores é absorvido pela água que está dentro dele, realizando o processo de aquecimento da água. A água quente que é menos densa que a água fria, começa a subir para o reservatório onde fica flutuando, fazendo com que a água fria desça, e assim sucessivamente, provocando uma circulação contínua da água pelo processo de convecção, até que todo o reservatório esteja aquecido na mesma temperatura ou que ocorra a pausa de radiação solar sobre as placas.

Dessa forma, é fundamental que o reservatório seja instalado em um ponto mais alto que o das placas coletoras, e deve estar revestido de mantas térmicas para assegurar água quente por mais tempo. O funcionamento da placa solar térmica em questão, difere das outras basicamente no material, como mostrado na Figura 3.

**Figura 3 Princípio de funcionamento da placa solar térmica polimérica**



**Fonte: Manual de construção de aquecedor solar de baixo custo – ASBC com placas de PVC (SUSTENTABIL ENERGIAS LTDA, 2007)**

O princípio de funcionamento da placa solar térmica polimérica é o mesmo da maioria das placas solares térmicas existentes, o que muda é o material usado. É importante ressaltar que a funcionalidade das placas pode não atender 100% da demanda do local, dessa forma é importante a instalação de um sistema de aquecimento auxiliar, como energia elétrica convencional (KIM et al., 2016).

## 2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE PLACAS SOLARES TÉRMICAS

Quando se trata de estudar uma ACV de um produto ou processo é importante consultar o que já foi pesquisado para que se obtenha uma coerência entre os métodos e parâmetros visando uma possível comparação de resultados. Sendo essa pesquisa direcionada a uma categoria específica de placa solar térmica é ideal que siga a linha de pesquisas existente para a comprovação de que esta tecnologia implica em maior ou menor impacto ambiental.

Buscando o embasamento teórico necessário para aplicação desses estudos, foram observadas diversas pesquisas relacionadas à avaliação do ciclo de vida de placas solares térmicas, sendo algumas destas dispostas na tabela 1 à seguir, junto com os critérios adotados e resultados obtidos.

Diante da amostra dos estudos relacionados à ACV de placas solares térmicas percebe-se o seguinte padrão das análises:

1- Grande parte dos estudos abrangem o sistema considerando desde a extração da matéria prima até o descarte final do produto. Entretanto, todos apresentam a fase de produção das placas solares como o principal causador de potencial impacto ambiental.

2- As metodologias mais utilizadas são: Eco-indicador 99, Recipe 2016 e CML 2001/IA.

3- A maioria dos estudos contempla as tecnologias convencionais, associando assim os maiores causadores de impactos ambientais os componentes: vidro, cobre e alumínio. Quando analisados sistemas não convencionais como placas compostas por PET e PVC, esses são os principais apontadores de impactos ambientais.

4- Quando comparado a um sistema fotovoltaico, o sistema solar térmico apresenta menores influências para causa de impactos ambientais.



**Tabela 1 Referência Bibliográfica**

<b>AUTOR</b>	<b>ANO</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>FRONTEIRA</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>IMPACTO</b>
ARANTES, L. O.	2008	Avaliação comparativa do ciclo de vida entre sistemas de aquecimento solar de água utilizados em habitações de interesse social	BERÇO AO TÚMULO	Eco-indicador 99	Cobre, PET e PVC
KORONEOS et. al	2012	Life cycle environmental impact assessment of a solar water heater	BERÇO À INSTALAÇÃO	Eco-indicador 99	Coletor
MONTOYA, J. R.	2012	Desarrollo de una metodología dentro de la fase de ecodiseño en el proceso de fabricación e instalación de placas solares térmicas mediante modelos de análisis ambiental según la metodología ACV, caso práctico	BERÇO AO TÚMULO	Eco-indicador 99	Uso
MARTINOPOULOS et. al.	2013	Identification of the environmental impact from the use of different materials in domestic solar hot water systems	BERÇO AO PORTÃO	Eco-indicador 99	Cobre e alumínio
CARNEVALE et. al.	2014	Resultados de tradução Life cycle assessment of solar energy system: comparison between photovoltaic and thermal water heaters on a domestic scale	BERÇO AO TÚMULO	Eco-indicador 95	Produção

LAMNATOOU et. al.	2015	The environmental performance of a building-integrated solar thermal collector based on multiple approaches and life-cycle impact assessment methodologies Build	PRODUÇÃO	Eco Indicador 99 e Impact 2002	Cobre
COMODI et. al.	2016	Life cycle assessment and energy-CO2-economic payback analyses of renewable domestic hot water systems with unglazed and glazed solar thermal panels	BERÇO AO TÚMULO	Eco-indicador 99	Cobre, alumínio e polipropileno
ARNAOUTAKIS et. al.	2017	Comparative experimental Life Cycle Assessment of two commercial solar thermal devices for domestic applications	BERÇO AO USO	Eco-indicador 99	fabricação
SOULIOTIS et. al.	2018	Solar water heating for social housing: energy analysis and Life Cycle Assessment	BERÇO AO TÚMULO	Eco-indicador 99	Silício e cobre
KYLILI et. al.	2018	Environmental assessment of solar thermal systems for the industrial sector	BERÇO AO USO	Eco-indicador 99	Produção
LORETO et. al.	2018	Avaliação da eficiência térmica e do potencial de impactos ambientais de sistemas de aquecimento solar de água produzidos a partir de materiais alternativos	BERÇO AO USO	Eco-indicador 99	Resina de poliéster e cobre
MHAMUD et. al.	2018	Environmental impacts of photovoltaic solar energy and solar thermal systems with life cycle assessment	BERÇO AO TÚMULO	ILCD, Impact 2002+, CED, Eco-pontos 97, Eco-indicador 99 e IPCC	Silício

ALBERTI et. al.	2019	Life Cycle Assessment of a solar thermal system in Spain, eco-design alternatives and derived climate change scenarios at Spanish and Chinese National levels	BERÇO AO USO	CML 2001	Vidro e cobre
MILOUSI et. al.	2019	Evaluating the environmental performance of solar energy systems through a combined life cycle assessment and cost analysis	BERÇO AO PORTÃO	Recipe 2016	Vidro, cobre e alumínio
MILOUSI et. al.	2020	Economic and environmental impacts of solar thermal technologies through life cycle assessment	BERÇO AO TÚMULO	CML 2001	Produção
KOŠICAN et. al.	2021	Life cycle assessment and economic energy efficiency of a solar thermal installation in a family house	BERÇO AO TÚMULO	CML - IA	Coletor

Fonte: Acervo da autora (2021).





## 2.3 MÉTODO DE ANÁLISE

A utilização de placas ou coletores solares, como opção de energia sustentável ou forma de reduzir o consumo de energias que causem impactos ambientais, deve ser verificada para saber qual o real impacto causado pela sua produção. Estudando as entradas e saídas de um processo, podem ser avaliados seus impactos ambientais e com esses aspectos quantificados, pode ser tomado medidas que minimizem seus impactos.

Com o intuito de regulamentar o uso e aplicação desse método de análise do ciclo de vida, foram criadas normas, sendo as principais: NBR ISO 14040:2009 – Gestão Ambiental – Análise do Ciclo de Vida, Princípios e Estrutura, que especifica a estrutura geral, princípios e forma de apresentação dos estudos de ACV; NBR ISO 14044: 2009 – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações, que apresenta um detalhamento das orientações gerais da norma relatada anteriormente; NBR ISO 14045: 2014 – Gestão Ambiental – Avaliação da eco eficiência de sistemas de produto – Princípios, requisitos e orientações, que explica como quantificar os impactos ambientais do ciclo de vida de um sistema de produto, assim como, determinar a perspectiva de ciclo de vida, completudeza, unidade funcional, transparência e abordagem científica e a ISO/TR 14049:2014 – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Exemplos de aplicação da ABNT NBR ISO 14044 quanto à definição de objetivo, escopo e análise de inventário.

Existem ainda, algumas referências que foram criadas para orientar o pesquisador a seguir um estudo de ACV consistente e com qualidade, baseados nas normas ISO 14040 e 14044.

A *EN 15804: 2012+A2: 2019: Sustainability of construction Works – Environmental product declarations – Core rules for the product category off construction products* (CEN, 2019), que determina as regras para declaração ambiental de produtos de construção civil, estipulou métodos de avaliação de impactos coerentes para a análise.

A partir nas normas de referência são determinados os parâmetros da pesquisa, bem como os métodos que serão abordados.

Os métodos de avaliação que abordam os fatores de caracterização estipulados com abordagem orientada ao problema (*midpoint*), estão presentes no módulo “CML 2001” desenvolvido pelo Instituto de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden, Holanda. O grupo de pesquisadores associados a esse instituto de Leiden, publicou um guia operacional para as normas ISO (GUINÉE et al, 2001b; GUINÉE et al, 2001c), nomeado Dutch Handbook on LCA (CML) com objetivo de fornecer orientação para conduzir um estudo aplicado a ACV, passo a passo.

De acordo com Takeda (2008), esse guia do CML apresenta uma lista de categorias de avaliação de impacto, pertencentes a três grandes grupos:

- 1- Categorias obrigatórias de impacto: são indicadores de categoria aplicados na maior parte das ACV's;
- 2 - Categorias de impacto adicionais: fazem referência à existência de indicadores operacionais, porém não são regularmente incluídos em ACV's;
- 3 - Outras categorias de impacto: Quando não existem indicadores operacionais disponíveis, tornando-se impraticável a inclusão quantitativa em estudos ACV.

As principais categorias de impacto do CML estão apresentadas na Tabela 2, bem como suas respectivas unidades de referência.

Além disso, segundo Costa (2012), devido a atribuição de notas e pesos no cálculo baseada em índices globais e a abrangência global das categorias que estão conformes com as características do meio ambiente brasileiro, esse método é o mais indicado para o cenário brasileiro.

**Tabela 2 Método de AICV utilizado (adaptado de CEN, 2019)**

MÉTODOS DE AICV	CATEGORIAS DE IMPACTO	UNIDADE
CML	Depleção potencial de recursos abióticos – não fósseis	kg Sb eq.
	Depleção potencial de recursos abióticos – combustíveis fósseis	MJ
	Potencial de aquecimento global - GWP100 anos	kg CO <sub>2</sub> eq.
	Potencial de destruição da camada de ozônio	kg CFC-11 eq.
	Potencial de toxicidade humana	kg 1,4-DB eq.
	Potencial de ecotoxicidade - aquático de água doce.	kg 1,4-DB eq.
	Potencial ecotoxicidade marinha aquática	kg 1,4-DB eq.
	Potencial ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq.
	Potencial de oxidação fotoquímica	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.
	Potencial de acidificação do solo e água	kg SO <sub>2</sub> eq.

A seguir será explicado cada categoria de impacto e suas especificações, de acordo com o manual (*Methods manual*, 2020) disponibilizado no site oficial do software Simapro®.

- Depleção potencial de recursos abióticos (fósseis e não fósseis)

Esta categoria está ligada à proteção do bem-estar humano, saúde humana e saúde do ecossistema, relacionados à extração de minerais e combustíveis fósseis devido aos insumos no sistema.

O Fator de Depleção Abiótica (ADF) é determinado para cada extração de minerais e combustíveis fósseis (kg equivalentes de antimônio / kg de extração) com base em reservas de concentração e taxa de acumulação. O escopo geográfico deste indicador está em escala global.

- Potencial de aquecimento global - GWP100 anos

Relaciona as alterações climáticas, que causam efeitos adversos sobre a saúde do ecossistema, a saúde humana e o bem-estar material. Está diretamente ligado às emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera

O modelo de caracterização desenvolvido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) é selecionado para o desenvolvimento de fatores de caracterização.

Os fatores são expressos como Potencial de Aquecimento Global para o horizonte de tempo de 100 anos (GWP100), em kg de dióxido de carbono / kg de emissão. O escopo geográfico deste indicador é em escala global.

- Potencial de destruição da camada de ozônio

Com a redução do ozônio estratosférico, uma fração maior da radiação UV-B atinge a superfície da Terra, esse fato acarreta efeitos nocivos sobre a saúde humana, a saúde animal, os ecossistemas terrestres e aquáticos, os ciclos bioquímicos e os materiais.

O modelo de caracterização é desenvolvido pela Organização Meteorológica Mundial (WMO) e define o potencial de destruição da camada de ozônio de diferentes gases (kg CFC-11 equivalente / kg emissão).

O escopo geográfico deste indicador é em escala global e relacionado a produção, com intervalo de tempo infinito.

- Potencial de toxicidade humana

Esta categoria diz respeito aos efeitos de substâncias tóxicas no meio ambiente humano. Os riscos à saúde decorrentes da exposição no ambiente de trabalho não estão incluídos.

Fatores de caracterização, Potenciais de Toxicidade Humana (HTP), descrevem o destino, a exposição e os efeitos das substâncias tóxicas para um horizonte de tempo infinito. Para cada substância tóxica, os HTP são expressos como 1,4- equivalentes de diclorobenzeno / kg de emissão.

O escopo geográfico deste indicador determina o destino de uma substância e pode variar entre escala local e global.

- Potencial de ecotoxicidade - aquático de água doce.

Refere-se ao impacto nos ecossistemas de água doce, em decorrência das emissões de substâncias tóxicas para o ar, a água e o solo.

O Potencial de Ecotoxicidade (FAETP) descreve o destino, a exposição e os efeitos de substâncias tóxicas. O horizonte de tempo é infinito. Fatores de caracterização são expressos como equivalentes de 1,4-diclorobenzeno / kg de emissão. O indicador aplica-se à escala global / continental / regional e local.

- Potencial ecotoxicidade marinha aquática

Refere-se a ecotoxicidade marinha correspondendo aos impactos de substâncias tóxicas nos ecossistemas marinhos, possui as mesmas características da ecotoxicidade da água doce.

- Potencial ecotoxicidade terrestre

Esta categoria se refere aos impactos de substâncias tóxicas nos ecossistemas terrestres, possui as mesmas características da ecotoxicidade da água doce.

- Potencial de oxidação fotoquímica

A formação de foto-oxidantes é a formação de substâncias reativas (principalmente ozônio) que são prejudiciais à saúde humana e aos ecossistemas e que também podem causar danos às plantações.

Este problema também é indicado com “smog de verão”. A poluição do inverno está fora do escopo desta categoria.

O Potencial Fotoquímico de Criação de Ozônio (POCP) para a emissão de substâncias ao ar é calculado com o modelo de Trajetória UNECE (incluindo o destino) e expresso em kg equivalentes de etileno / kg de emissão. O intervalo de tempo é de 5 dias e a escala geográfica varia entre a escala local e continental.

- Potencial de acidificação do solo e água

Substâncias acidificantes causam uma ampla variação de impactos no solo, águas subterrâneas, águas superficiais, organismos, ecossistemas e materiais (edifícios).

O Potencial de acidificação (AP) para emissões para a atmosfera é calculado com o modelo RAINS 10 adaptado, descrevendo o destino e a deposição de substâncias acidificantes. AP é expresso como kg SO<sub>2</sub> equivalentes / kg emissão. O intervalo de tempo é a eternidade e a escala geográfica varia entre a escala local e a escala continental.

Fatores de caracterização, incluindo destino, foram usados quando disponíveis, quando não disponíveis não foram utilizados.

O método foi estendido para ácido nítrico, solo, água e ar; Ácido sulfúrico, água; Trióxido de enxofre, ar; Cloreto de hidrogênio, água, solo; Fluoreto de hidrogênio, água, solo; Ácido fosfórico, água, solo; Sulfeto de hidrogênio, solo, tudo sem incluir o destino. Óxido nítrico, ar (é monóxido de nitrogênio) foi adicionado incluindo o destino.

- Potencial de eutrofização

A eutrofização, que também é conhecida como nitrificação, inclui todos os impactos devidos a níveis excessivos de macronutrientes no meio ambiente causados por emissões de nutrientes para o ar, a água e o solo.

O potencial de nitrificação (NP) é baseado no procedimento estequiométrico de Heijungs (1992) e expresso em kg PO<sub>4</sub> equivalentes por kg de emissão.

Destino e exposição não estão incluídos, o período de tempo é a eternidade e a escala geográfica varia entre a escala local e continental.

## 2.4 FERRAMENTAS QUE AUXILIAM A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

O estudo da ACV engloba a coleta de dados primários de todos os fluxos que englobam o sistema analisado e é extremamente complexo coletar todos esses dados, faz-se uso dos bancos de dados de inventários.

Esses bancos de dados possuem as características regionais de onde foram produzidos, entretanto existem bases de dados com cobertura internacional, como a de origem suíça ecoinvent®, a alemã Gabi® entre outras (CURRAN, 2006).

Além de bancos de dados se faz necessário *softwares* que auxiliam o desenvolvimento dos inventários e a aplicação dos métodos de AICV para o cálculo de indicadores de impacto ambiental, dentre eles os mais conhecidos são: Eco-Quantum®, Equer®, Gabi®, Umberto®, SimaPro® entre outros (TORGAL, JALIALI, 2010). Cada um desses *softwares* possui características variadas, algumas possuem bancos de dados de referência específicos, o que limita o estudo (CAMPOLINA et al, 2015).

Serão utilizados nesse estudo o banco de dados ecoinvent® e o *software* SimaPro®, que serão detalhados a seguir.

### 2.4.1 ecoinvent®

Essa ferramenta foi desenvolvida pelo Instituto Federal Suíço para Pesquisa e Testes de Materiais (EMPA) em conjunto com vários institutos governamentais suíços. Sua primeira versão da base de dados foi desenvolvida em 2003 e a mais atual, versão 3.6 em setembro de 2019, que conta com mais de 10 mil inventários.

Consiste em dados de inventários, em que cada item constituinte e suas quantidades são relacionados a unidade declarada de cada sistema de produto, descrevendo todos os fluxos que entram e saem do sistema.

O ecoinvent® possui uma grande variedade de ICV's disponíveis com abrangência internacional; fornece processos tanto unitários (*unit processes*) como sistemas (*system processes*), é flexível quanto às relações entre ICVs; tem coerência

entre a fronteira do sistema e alocação; apresenta rotina de cálculo com relatórios de metadados; permanece sempre atualizado pelo Centro ecoinvent®. Cada fluxo de inventário possui um valor de incerteza associado, que se soma às características citadas acima (GOEDKOOOP et al, 2010). A versão utilizada nesta pesquisa é a 3.6.

#### 2.4.2 Simapro®

O *software* SimaPro® é utilizado em nível mundial para a execução de projetos de ACV. Foi desenvolvido pela empresa Pré-sustainability na Holanda e coordena completamente um estudo de ACV, permitindo que o usuário modele o produto ou processo analisado por meio de banco de dados.

Além disso, possui a função de gerenciar os dados primários levantados, além de inventários de ciclo de vida, incluindo o banco de dados atualizado *ecoinvent*® 3.6, permite realizar análise de ICV e AICV por meio de várias metodologias. Atualmente o *software* apresenta a versão 9.1 e as metodologias novas e ou atualizadas constam na Tabela 3 e são divididas por “*midpoint*” e “*endpoint*”:

**Tabela 3 Métodos de AICV disponíveis no Simapro® 9.1**

“Midpoint”	“Endpoint”
CML-IA	Recipe 2016 Endpoint
Environmental Prices Midpoint	Environmental Prices Endpoint
ILCD 2011 Midpoint+	Pfister et al 2009 (Ecoindicador 99)
ReCiPe 2016 Midpoint	Ecosystem Damage Potential
Impact 2002+	USEtox 2
Water Footprint: Boulay et al 2011 (Human Health)	Water Footprint: Boulay et al 2011 (Human Health)
Water Footprint: Motoshita et al 2011 (Human Health)	Water Footprint: Motoshita et al 2011 (Human Health)
Water Footprint: Pfister et al 2009 (Ecoincador 99)	Water Footprint: Pfister et al 2009 (Ecoincador 99)
USEtox 2	Water Footprint: Pfister et al 2010 (ReCiPe)
Water Footprint: AWARE	Recipe
Traci 2.1	
Recipe	



**Fonte: Adaptado do site: [https://support.simapro.com/articles/Manual/SimaPro-Methods-manual/\(2020\)](https://support.simapro.com/articles/Manual/SimaPro-Methods-manual/(2020)).**

De um modo geral, o *software* une os dados de ICV com as metodologias escolhidas e efetua os cálculos apresentando os resultados em forma de fluxograma, por impactos, entre outros. A versão do *software* utilizada nessa pesquisa é a 9.0, disponibilizada por licença gratuita para a Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR e para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, do campus de Pato Branco.

### 3 ESTUDO DE CASO

O presente estudo de caso compreende a caracterização dos potenciais impactos ambientais, por meio da avaliação do ciclo de vida, ligados a fabricação de uma placa solar térmica, feita com material polimérico e de baixo custo, com fábrica localizada na cidade de Pato Branco, PR.

Seguindo o método apresentado anteriormente, juntamente com as ferramentas escolhidas para o processamento dos dados aferidos, a seguir serão apresentadas as deliberações encontradas para a pesquisa proposta, bem como os caminhos percorridos para cumprir os seguintes objetivos:

- Investigar o sistema de produção das placas solares térmicas, bem como quantificar e qualificar o Inventário do Ciclo de Vida do processo estudado.
- Diante do inventário, avaliar e discutir quais componentes da placa de estudo, que diferenciam das placas comerciais usuais e que podem contribuir para um menor impacto ambiental;
- Identificar quais categorias de impacto representam indicadores potenciais para o caso específico das placas solares térmicas, buscando um desenvolvimento específico da área em questão;
- Avaliar os possíveis impactos ambientais no uso de energia solar térmica, estabelecendo a relação do impacto individual e global desse sistema de placa solar;
- Estabelecer um comparativo entre pesquisas com condições e critérios similares, contrastando quantitativos e variações das possibilidades desses sistemas.

#### 3.1 OBJETIVO E ESCOPO

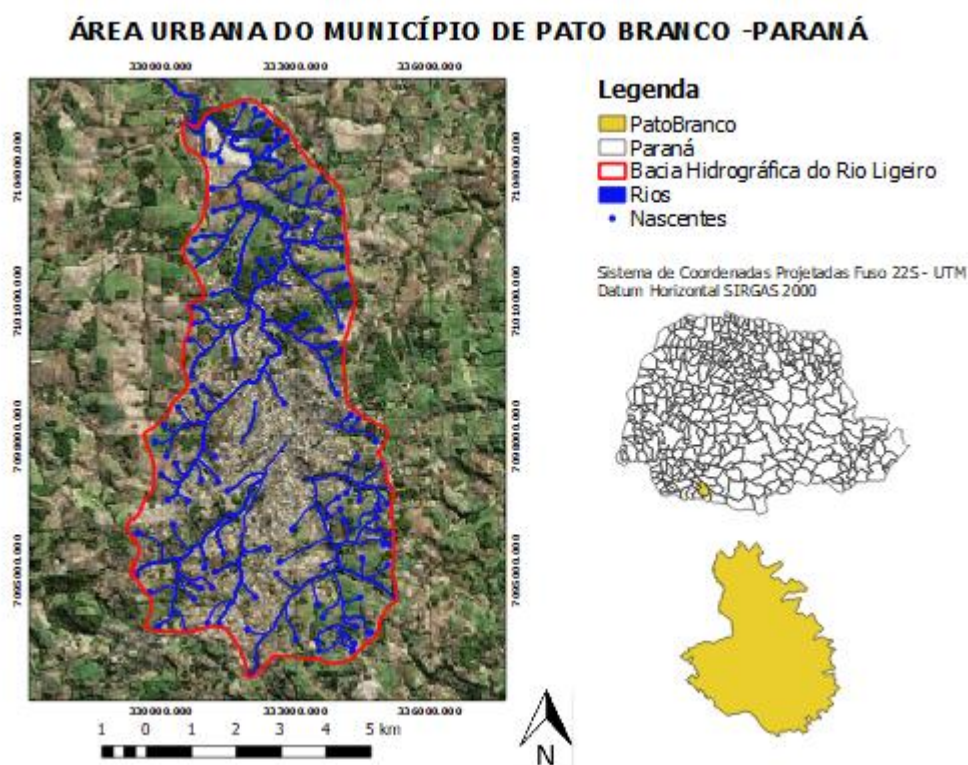
Primeiramente definiu-se o objetivo desta pesquisa, que busca caracterizar os potenciais impactos ambientais causados pela produção de uma placa solar térmica, produzida na cidade de Pato Branco - PR, composta por material polimérico, destinada a uso residencial.

Para cumprir esse objetivo, foi necessário caracterizar o produto e todo o processo de produção. Para a coleta de dados, bem como a quantificação e qualificação dos insumos envolvidos na produção, foi realizada uma visita à fábrica.

### 3.1.1 Área de estudo: Pato Branco, Paraná

O município de Pato Branco está localizado na região Sudoeste do Estado do Paraná. Possui uma área territorial total de 539,087 km<sup>2</sup>, sendo que deste total 54,34 km<sup>2</sup> compõem o perímetro urbano do município (Figura 4). Considerando que cerca de 94% da população patobranquense reside em território urbano e que a bacia hidrográfica do Rio Ligeiro compreende essa região, a área de estudo adotada nessa investigação compreende a referida bacia (IBGE, 2010).

Figura 4 Localização da cidade de Pato Branco no estado do Paraná e mapa urbano do município



Fonte: Autoria própria (2020)

A região analisada levou em conta quais os melhores lugares para implantação de placas solares em residências e indústrias, visando estimar quais locais atendem a irradiação máxima durante a maior parte do ano, viabilizando assim a utilização eficiente de áreas para captação de energia solar.

De acordo com Pinho e Galdino (2014), regiões com níveis de irradiância superiores a 3 kWh/m<sup>2</sup>. dia são consideradas apropriadas para introdução de sistemas de captação solar, como as placas solares. Analisando o histórico de incidência solar de Pato Branco, verifica-se que apenas no mês de junho os níveis de irradiação solar não atingiram o mínimo (TIEPOLO et al., 2017). Assim, de acordo com os níveis de irradiância medidos, a cidade de Pato Branco comporta a instalação de placas solares.

### 3.1.2 Caracterização da Placa Solar Térmica Polimérica

Para escolha do produtor das placas solares, foi levado em consideração a preocupação do mesmo com o meio ambiente; tecnologias não convencionais; baixo custo, pois é um fator importante para a comercialização abrangente da população com renda variada; destino final das placas, entre outros.

A fábrica escolhida para o estudo foi a Sustentabil Energias LTDA, localizada na cidade de Pato Branco, Paraná. No momento da coleta, a empresa estava incubada na UTFPR de Pato Branco e era considerada de pequeno porte, fabricando as placas de forma manual, o que permite um cuidado particular em cada etapa da produção. No entanto, devido à pandemia causada pela COVID-19, a empresa não conseguiu permanecer ativa no mercado. Esse fato tornou-se uma limitação ao estudo, visto que não foi possível coletar mais dados nem acompanhar a instalação das placas.

A estimativa de aquecimento de água com essas placas é em torno de 60°C, considerando um dia com insolação solar média na cidade de estudo, Pato Branco, Paraná.

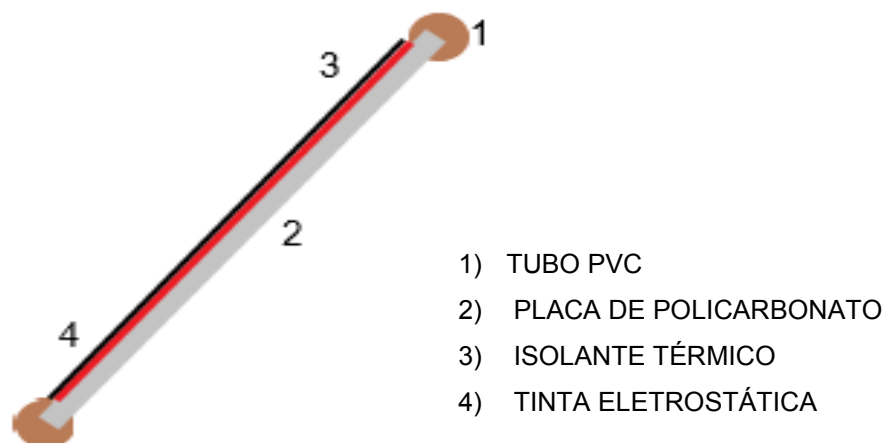
A recomendação para utilização residencial é uma placa por habitante. Essa estimativa leva em conta que cada pessoa tome um banho por dia, com duração média de 8,1 minutos, com temperatura necessária para esse banho de no máximo 45°C, observando que para chegar a essa temperatura confortável seja necessário fazer uma mistura com água fria (CIRRA, 2010).

É importante ressaltar que o estudo em questão considera os dados de instalação na cidade de Pato Branco, entretanto as placas podem ser instaladas em outras cidades, para isso deverá ser estudada a questão de irradiação solar local, bem como as especificidades do local requerido.

Com característica inovadora e utilização de material não convencional, sua constituição é principalmente de material polimérico (módulo de policarbonato), cerca de 80%.

A figura a seguir apresenta um esquema em corte da disposição dos componentes da placa solar térmica polimérica:

**Figura 5 Componentes da placa solar térmica em corte**



Fonte: Autoria própria (2021)

### 3.1.3 Definição da função e unidade funcional

Para a determinação da função e unidade funcional do sistema estudado, seguiu-se o fluxo de referência apresentado na figura a seguir:

**Figura 6 Identificação da função e unidade funcional**

PRODUTO	•Placa solar térmica
FUNÇÃO	•Aquecimento de água
PERFORMANCE DO PRODUTO	•Capacidade de aquecer 62,5 l de água à temperatura de 60 °C
UNIDADE FUNCIONAL	•Fornecer 62,5 l de água aquecida à 60 °C

Fonte: Autoria própria (2020)

A função do processo é o aquecimento da água pelas placas solares, dessa forma, a relação com a unidade funcional deve ser direcionada a essa função. Considerando que um banho com tempo médio dura em torno de 8,1 minutos, que a temperatura necessária para esse banho é de no máximo 45°C, e que as placas esquentam a água a uma temperatura maior que essa, é necessário considerar a quantidade de água para mistura (CIRRA, 2010).

A placa solar térmica em estudo esquentará água a uma temperatura máxima de 60°C, considerando um dia com insolação solar média na cidade de estudo, Pato Branco, Paraná. Mesmo a água excedendo a temperatura máxima ideal para um banho, ela foi utilizada, pois com a mistura com a água fria ela diminuirá e se adequará para o banho.

Para armazenar essa água quente é necessário um reservatório, e que no caso dessa pesquisa será considerado um reservatório para água quente com capacidade para 250 litros. Conforme indicação do fabricante são instalados 4 (quatro) módulos de placa solar térmica por residência, na estimativa de uma placa por habitante. Sendo assim a capacidade de água a ser aquecida por placa é de 62,5 litros por placa. Com isso, foi determinada a Unidade Funcional (UF) como: "Fornecer 62,5 l de água aquecida à 60 °C".

#### 3.1.4 Definição do sistema de produto

O sistema estudado tem suas delimitações na cidade de Pato Branco, Paraná, onde o produto é fabricado e instalado. Já o sistema de produto para o ciclo de vida ou a fronteira, considera a produção de placas solares térmicas poliméricas, ou seja, do berço dos insumos até o portão de saída da fábrica (*cradle to gate*).

Nesse sistema foram considerados os insumos que compõem o processo de fabricação da placa, incluindo os materiais componentes da placa solar (módulo de policarbonato, cano de PVC, tinta automotiva preta, isolante térmico, cola de contato, abraçadeira, cola para PVC e conexões). Como o sistema considera apenas a produção, para esses insumos foram considerados o transporte, descritos e caracterizados posteriormente.

Além disso, durante a etapa produtiva foram considerados a energia elétrica e a água utilizada na fábrica durante a produção, contabilizados por média consumida na fábrica

As saídas estão relacionadas a emissões de poluentes e descarte de resíduos gerados na produção, conforme apresentado na Figura 7.

**Figura 7 Fluxos de entrada e saída do sistema**



**Fonte: Autoria própria (2020)**

A Figura 7 apresenta de forma geral quais os possíveis fluxos envolvidos com a produção das placas relacionando a fronteira do sistema determinada. A fim de coletar as informações de entradas e saídas são englobadas em todo processo, foi necessária uma visita à fábrica, para a verificação de cada passo da produção. Com isso foi possível qualificar e quantificar cada etapa do processo. Os dados coletados nessa visita foram referentes a valores padronizados pelo fabricante.

### 3.2 VISITA À FÁBRICA E APLICAÇÃO DO QUESTIONÁRIO

No dia 18 de setembro de 2019 foi realizada visita à fábrica da Sustentabil Energias LTDA. Nesse dia foi possível acompanhar o processo de fabricação das placas solares, coletar dados e aplicar o questionário elaborado (ANEXO A – Formulário preenchido). Devido à pandemia causada pela COVID-19 e consequentemente ao fechamento da empresa, não foi possível realizar novas coletas de dados, para o tratamento de cálculo estatístico dessa pesquisa.

Todo o processo de fabricação das placas é feito no mesmo lugar, ou seja, toda matéria prima chega até o barracão da empresa, encomendado de acordo com a demanda requerida, é montado e conduzido até o lugar de instalação.

Com toda a matéria prima já no barracão, o processo de produção das placas começa com o corte dos tubos de PVC. São utilizados dois pedaços, com dimensões

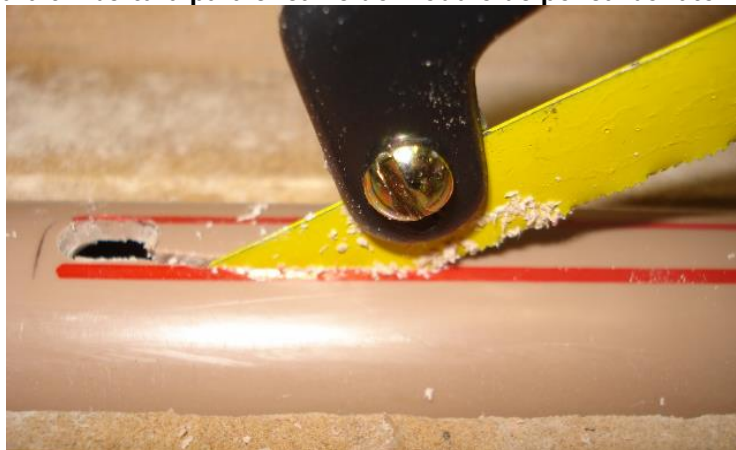
de 32 mm de espessura e 80 cm de comprimento cada, figura 8. Com o corte feito do comprimento adequado para a placa, é necessário fazer uma abertura em cada pedaço de tubo para que seja embutida a placa de policarbonato, como mostrado na Figura 9:

**Figura 8 Corte do comprimento dos Tubos de PVC**



Fonte: A autoria própria (2019).

**Figura 9 Abertura para encaixe do módulo de policarbonato**



Fonte: A autoria própria (2019).

Feito os cortes, é necessário lixar e adequar o espaço para que o encaixe entre os canos e o módulo sejam exatos. O módulo de policarbonato possui a dimensão de (0,8x1,0) m. Para a fixação entre os canos e a placa é utilizado uma cola de soldagem para canos de PVC de água fria. Essa cola deve ser reaplicada no dia seguinte, para que se forme uma parede de soldagem espessa, formando resistência



mecânica e vedação suficiente para o bom funcionamento da placa. O resultado da fixação dos canos e da placa é apresentado na Figura 10.

**Figura 10 Módulo de Policarbonato fixado nos tubos PVC**



**Fonte: Autoria própria (2019).**

Após a fixação da placa nos canos, é feita uma cobertura dessa placa com um isolante térmico (manta térmica), é utilizado uma cola de contato para a fixação. Esse isolante cobre toda a extensão da placa, como apresentado na Figura 11.

**Figura 11 Colagem do isolante térmico na placa de policarbonato**



**Fonte: Autoria própria (2019).**

Quando o isolante estiver completamente colado à superfície da placa, começa a etapa de pintura. A placa é pintada com tinta preta, que garante a absorção do espectro de luz. Segundo recomendação do fabricante, essa tinta deve ser reaplicada a cada dois anos, ou seja, considerando que as placas tenham uma vida útil de dez anos, a tinta será aplicada um total de cinco vezes. O resultado final consta na Figura 12.

**Figura 12 Pintura das placas**



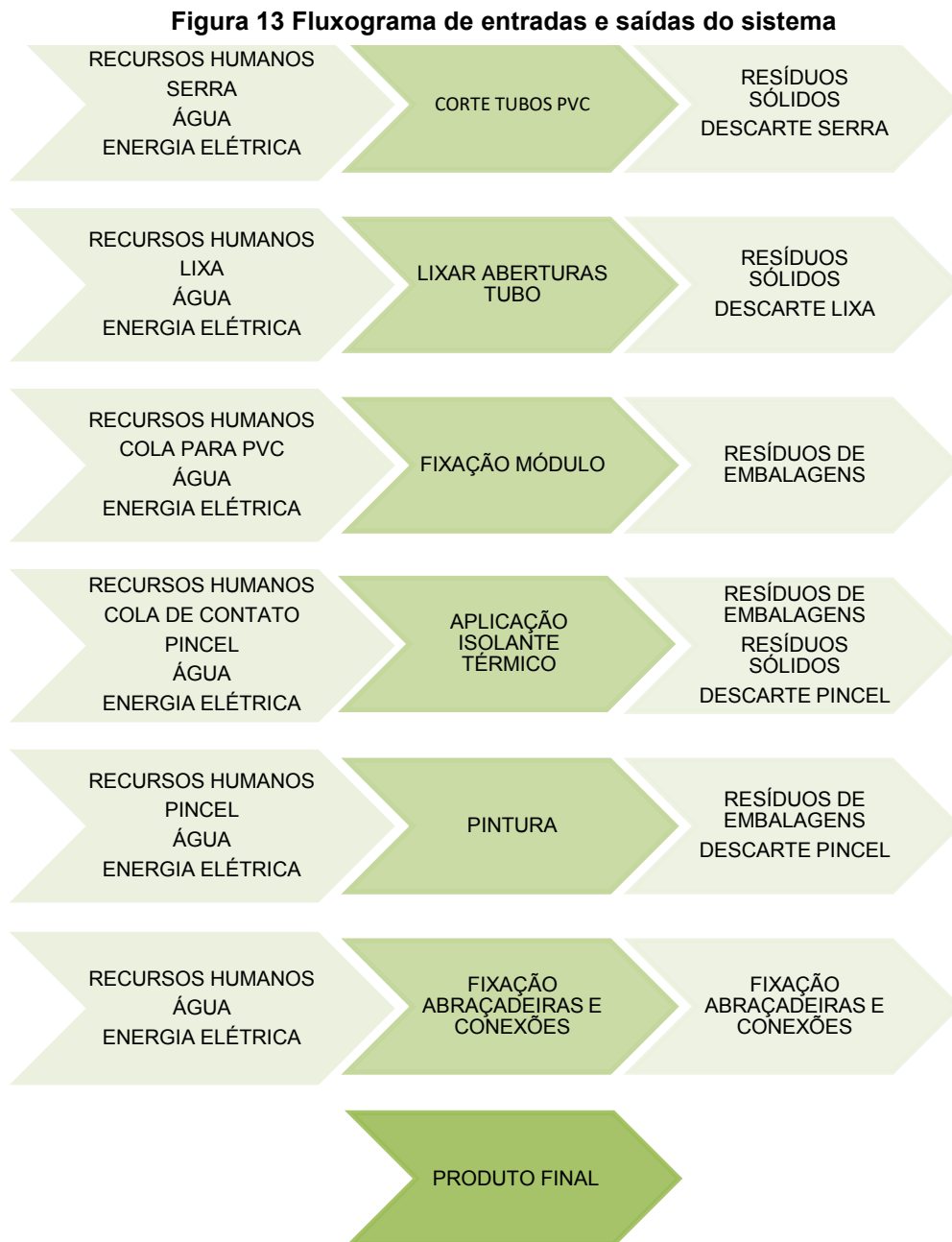
**Fonte: Aatoria própria (2019).**

Considerando que os coletores são fixados a outras superfícies para a sua instalação, como telhados e suportes para piscina, abraçadeiras metálicas são instaladas aos coletores ainda na fábrica para posterior fixação na superfície final. Nas entradas e saídas de água das placas, são utilizadas conexões de PVC, que são tampas para fechar a extremidade de uma tubulação (cap soldável) e joelho soldável 90°, dependendo de cada sistema instalado.

Também foram contabilizados dados médios de água e energia elétrica utilizados no processo de fabricação. A água contabilizada está ligada ao uso no banheiro da fábrica e algumas torneiras para uso esporádico, já a energia elétrica é utilizada nas lâmpadas da fábrica e algumas tomadas, também para uso esporádico.

Para as saídas do sistema foram observados os resíduos da produção, bem como o descarte de embalagens. Analisando a produção percebeu-se que não

existem emissões poluentes para o ar. Na Figura 13 segue o fluxograma das entradas e saídas observadas em todo processo de fabricação dos coletores solares.



Fonte: Acervo autoral (2020).

Observando a cadeia produtiva da placa solar térmica, percebe-se que não existe processo na produção que necessite de transporte, visto que o espaço que a empresa utiliza é de pequeno porte

Na Figura 14 é apresentado um exemplo das placas instaladas em uma propriedade rural, dispostas de acordo com a necessidade do cliente.

**Figura 14 Exemplo de placa solar térmica instalada**



**Fonte: Autoria própria (2019).**

O exemplo citado apresenta a instalação das placas solares térmicas com destino residencial para uma família com quatro integrantes, foi considerado os mesmos apontamentos e padrões dos adotadas para a instalação em uma residência na cidade de Pato Branco, PR.

### 3.3 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)

Para dar entrada no Inventário do Ciclo de Vida (ICV) foi necessário quantificar cada uma dessas entradas e saídas apresentadas. Com base nos dados disponibilizados pelo fabricante, aliado à visita à fábrica e aplicação do questionário, foi calculado quanto de cada uma dessas entradas representa na unidade funcional escolhida: “Fornecer 62,5 l de água aquecida à 60 °C”.

A contabilização dessas entradas e saídas foi feita por convenção dos dados coletados e revisões com o fabricante. A falta de dados estatísticos ocorreu devido ao fato do fechamento das atividades da fábrica fornecedora das placas solares térmicas. Esse fato impediu a determinação e estipulação de erros associados às medidas tomadas, bem como o erro progressivo associado a todo o processo.

Para a saída foram considerados os resíduos sólidos da produção, que são as embalagens plásticas dos materiais utilizados na produção e resíduos dos cortes dos tubos de PVC. Os descartes das ferramentas (serra e pincéis) e embalagens com resíduos (colas e tinta) não foram computados, isso tornou-se uma limitação, pois podem existir impactos potenciais associados a esses componentes.

A emissão de poluentes ao ar pelo transporte não foi contabilizada individualmente pois foi estimada no módulo escolhido no banco de dados, como apresentado na Tabela 4. Entretanto para módulos escolhidos que não abrangiam um dado médio de transporte, foi considerado o dado do transporte.

**Tabela 4 Entradas para o inventário do ciclo de vida**

INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA			
ENTRADA		QUANTIDADE	UNIDADE
1	Módulo Polic.	0,800	m <sup>2</sup>
2	Cano PVC 32mm	1,600	m
3	Tinta preta	0,200	l
4	Isolante térmico	0,800	m <sup>2</sup>
5	Cola contato	0,050	kg
6	Conexões	3,000	UNIDADE
7	Abraçadeira	6,000	UNIDADE
8	Cola PVC	0,080	kg
10	Energia Elétrica	5,000	kWh
11	Água	0,050	m <sup>3</sup>
12	Transporte	0,214	tkm
SAÍDA		QUANTIDADE	UNIDADE
1	Resíduos sólidos	0,2	kg

Fonte: Autora (2020).

Para a quantificação total do impacto foi necessário adequar as unidades de medidas iniciais para as unidades dos módulos encontrados no banco de dados. A seguir será descrito cada entrada, saída e o módulo correspondente escolhido, bem como qual parâmetro utilizado na conversão de unidades. É importante recordar que

todos os parâmetros abordados a seguir são baseados no uso do banco de dados doecoinvet® v3.6 e no *software* SimaPro® v9.0 com abrangência global com processos tipo *Market*.

### 3.3.1 Módulos do ecoinvent®

A seguir serão apresentados os módulos do banco de dados do ecoinvent® escolhidos, bem como os parâmetros de corte e locação de cada um.

#### 3.3.1.1 Módulo de policarbonato

Para a contabilização do módulo ou placa de policarbonato, foi levado em consideração que as peças são compradas já do tamanho exato da placa. Dessa forma, para ser construído um coletor com capacidade de esquentar 62,5 litros de água a 60°C foi utilizada uma placa de medidas 0,8x1m, com 0,006m de espessura e peso estimado de 6,0 kg por m<sup>2</sup> de módulo de policarbonato.

Dessa forma foi determinado o peso da placa (kg), que é a unidade utilizada pelo banco de dados para o seguinte módulo: “Polycarbonate {GLO}|market for|Cut-off,U”. Esse módulo escolhido possui escala global e já contém o transporte em sua composição, foi escolhido por melhor representar a entrada em questão, que é o módulo de policarbonato.

Desse módulo a única saída encontrada é o descarte das embalagens em que essas placas chegam a fábrica, sendo assim resíduos plásticos.

#### 3.3.1.2 Tubo PVC e conexões

Os tubos e conexões são feitos de PVC e resinas, para a contabilização dessas entradas foram convertidos os seus respectivos comprimentos, suas bitolas (32mm) e suas especificações em kg, os parâmetros utilizados foram encontrados nos sites de fabricantes desse material. Como as especificações desse tipo de material é normatizada, os valores são os mesmos, mesmo variando o fabricante.

Os tubos têm o peso de 0,3kg/m e as conexões (cap. e joelho soldável) 0,041kg por unidade, todos na bitola de 32mm. O módulo usado foi o: “PVC pipe E”. O módulo contempla a produção de tubos de PVC, incluindo a produção da resina de PVC, transporte da resina até o conversor, o processo de conversão e a embalagem do produto acabado para posterior envio. Para esse módulo foi considerado o

transporte do produto até o destino final, que é a fábrica, visto que ele não está na composição e especificação do mesmo.

A produção acarreta alguns resíduos, seja com corte ou com a lixa, dessa forma os valores observados desses resíduos se encontram no mesmo módulo dos resíduos plásticos.

#### 3.3.1.3 Cola para PVC

A cola para uso nos tubos e conexões de PVC, mais conhecido como adesivo plástico, é composta por uma mistura de solventes formaldeídos, cetonas e resinas de PVC. A cola para PVC em questão é o Adesivo *Aquatherm* da marca Tigre®, ela resiste até 80°C e possui o “Selo Verde” *Low-VOC*, que caracteriza a baixa emissão de solventes, tendo um menor impacto ambiental do que os outros tipos de adesivos comercializados.

Não existe um módulo com as características que abranjam exatamente a composição do adesivo plástico, entretanto foi encontrado um módulo que representasse parcialmente a sua composição: “Polyvinylchloride, emulsion polymerised {GLO} | market for | Cut-off, U”, para este módulo o transporte está computado devido ao módulo *market for*.

A quantidade dessa cola utilizada para a produção da placa solar térmica é de 0,08 kg. O descarte de embalagem do adesivo plástico não foi contabilizado, devido ao grande rendimento da cola e a falta de dados. Sabe-se que o descarte desses resíduos é importante, entretanto entram como limitação do estudo.

#### 3.3.1.4 Tinta eletrostática

A tinta preta tem a composição eletrostática, ou seja, por meio de cargas elétricas fixa e dá resistência a tinta, é predominantemente utilizada para pinturas de automóvel. Segundo o fabricante (Farben tintas) cada litro dessa tinta possui 1,444 kg. O módulo correspondente no ecoinvent® é o: “Electrostatic paint {GLO} |market for | Cut-off, U”, neste módulo está incluso a questão do transporte até a fábrica.

O descarte associado ao uso dessa tinta não foi contabilizado, entrando também como uma limitação do estudo.

#### 3.3.1.5 Isolante térmico

O isolante térmico empregado nas placas é a comumente chamada manta térmica, instalada em telhados de residências, conferindo conforto térmico ao ambiente. Quando aplicada no módulo, auxilia na absorção de calor. Essa manta é composta por uma camada de isopor, revestida por uma folha de alumínio, as duas camadas são extremamente finas e leves, com peso de 0,097 kg/m<sup>2</sup>.

No banco de dados doecoinvent® não foi encontrado um módulo que especificasse exatamente a composição do isolante, por isso, foi escolhido um módulo com a característica mais semelhante, ou seja, verificando sua composição. Dessa forma, o módulo usado foi: “Polystyrene foam slab {GLO} market for | Cut-off, U”. Neste módulo está englobado o transporte até a fábrica.

#### 3.3.1.6 Cola contato

A cola de contato é usada para fixar o isolante térmico ao módulo de policarbonato, é denominada adesivo de contato sem Toluol é da marca Cascola®, a não utilização do Toluol proporciona maior segurança aos usuários, visto que o Toluol, ao ser inalado pode afetar o sistema nervoso central e causar problemas respiratórios, neurológicos e causar dependência química. Esse componente foi substituído por um mix de solventes menos tóxicos à saúde e ao meio ambiente.

Da mesma forma que o módulo do adesivo de contato, foi utilizado um módulo com as características que mais se assemelhavam ao composto total da cola. Para isso foi escolhido o módulo: “Liquid epoxy resins E”. Esse módulo não apresenta o transporte médio como os outros módulos utilizados, entretanto, como seu percentual de composição total da placa é de 0,83% foi determinado o corte da sua porcentagem do transporte.

O descarte de seu resíduo também não foi contabilizado no total das saídas do sistema estudado, justificado pela sua baixa utilização, entrando nas limitações deste estudo.

#### 3.3.1.7 Abraçadeiras

As abraçadeiras foram adicionadas ao composto da produção da placa solar térmica pois são utilizadas para a fixação da placa ao telhado ou superfície em que será instalada. O módulo escolhido para representar essa entrada é o:



“Ferrochromium, high-carbon, 68% Cr {GLO}| market for |Cut-off, U”. A escolha desse módulo de Ferro-Cromo com alto teor de Carbono (FeCrAC), se justifica pela sua resistência à corrosão, alta resistividade elétrica e alta liga. Esse módulo já engloba o transporte até a fábrica.

O resíduo associado a esse módulo é o resíduo plástico das embalagens, que está contabilizada no módulo de descarte plástico.

#### 3.3.1.8 Energia elétrica

O quantitativo do consumo de eletricidade utilizado na fábrica foi feito a partir das contas de energia elétrica disponibilizadas pelo fabricante. Nessa conta consta o consumo total (equipamentos elétricos e infraestrutura da fábrica) de energia elétrica em kWh.

No processo de produção e fornecimento de energia elétrica, foi utilizado os dados de inventário de energia brasileiro, visto que o parâmetro de fornecimento de energia é especificamente divergente de outras regiões do mundo. Os outros módulos não foram adaptados com a energia elétrica de hidrelétricas pelo fato de que alguns possuem sua produção fora do Brasil, contando também que está sendo estudada a produção, correspondendo a energia elétrica desse sistema estar ligado apenas a produção das placas solares.

O módulo usado foi: “Electricity, medium voltage {BR} | market for | Cut-off, U” encontrados no Ecoinvent®. Este módulo inclui as entradas de eletricidade produzidas no Brasil, a rede de transmissão, emissões diretas para o ar e as perdas de eletricidade durante a transmissão.

#### 3.3.1.9 Água

A água utilizada na fábrica é proveniente da rede de abastecimento e é consumida apenas no banheiro do local, a unidade de medida utilizada do banco de dados é o metro cúbico (kg). O módulo utilizado referente a esse consumo de água foi o “Tap water {RoW}| market for | Cut-off, U”.

#### 3.3.1.10 Transporte

O transporte foi utilizado no banco de dados apenas para os módulos que não continham o transporte, pois os módulos utilizados com a especificação de “*market*

*for*” já contêm esse dado médio. Dessa forma, o transporte foi considerado apenas para o módulo dos tubos de PVC e conexões, para manter o mesmo dado médio de transporte em todos os itens.

Para a sua determinação, foram aferidos os dados de transportes fornecidos pela transportadora dos produtos, somando a distância da fábrica até o comerciante local, e dele até a fábrica dos módulos solares. Com isso fez-se a proporção do peso desses materiais para a unidade funcional do processo, por tonelada associada a quantidade de quilômetros rodados.

O transporte considera o deslocamento dos tubos e conexões da fábrica localizada em Fazenda Rio Grande, Paraná, onde está localizada a fábrica fornecedora desses materiais, a Plasilit® até Pato Branco, Paraná.

O módulo escolhido foi: “Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 | Cut-off, U”. Esse módulo europeu escolhido corresponde à realidade brasileira no quesito emissões atmosféricas.

#### 3.3.1.11 Resíduos sólidos

Os resíduos sólidos compõem a saída do sistema, ou seja, é a resultante do processo de fabricação. Para a determinação da saída de resíduos sólidos, foram computadas as embalagens descartadas e resíduos dos cortes dos tubos de PVC, consistindo em sua maioria por plástico que poderá ir para a reciclagem.

Não foi considerado o impacto dessa reciclagem desses materiais no estudo, visto que o limite dessa pesquisa visa a produção, e o destino desse resíduo ser posterior a esse processo.

As embalagens da tinta preta e colas não foram consideradas, como citadas anteriormente, mesmo sendo um resíduo perigoso e sua não consideração desses resíduos acarreta em limitações do estudo.

A unidade de medida adotada no banco de dados é o quilograma (kg). O módulo utilizado para esse resíduo é o “Plastic Waste” que integra o módulo “fluxos finais de resíduos”.

#### 3.3.1.12 Placa solar térmica polimérica

A placa solar térmica polimérica é a resultante de todas as etapas de produção. Esse módulo é apresentado aqui como processo que foi analisado, e se for certificado e incluído na base de dados do ecoinvent® ter sua referência baseada nos parâmetros descritos anteriormente.

A unidade utilizada para representar esse módulo é o quilograma (kg), fazendo a proporcionalidade de todas as entradas e saídas, considera-se que a placa tem um total de 5,9505 kg, relacionando as unidades de medida adotadas em todos os módulos.

O módulo confeccionado na resultante desse estudo é: “Polymeric thermal solar plate {BR} |production|Cut-off, U”. A escolha dessa nomenclatura é devido a caracterização da produção considerando módulos relativos à realidade brasileira, como exemplo o transporte, englobando o processo de produção, não computando o processo de transporte dessa placa até o usuário, explicando a utilização do termo “*production*”.

#### 3.3.2 Estruturação do inventário do ciclo de vida

Determinadas as entradas e saídas do sistema para a fabricação de uma placa solar térmica polimérica, que possui a função de aquecer 62,5l de água a 60° C, considerando a instalação na cidade de Pato Branco, PR, adequando cada item para a sua correspondente do ecoinvent®, são apresentados na Tabela 5 as entradas do sistema, ajustadas a unidade utilizada no *software* Simapro® e seus respectivos módulos, e na Tabela 6, da mesma forma, são apresentadas as saídas.

**Tabela 5 Dado das ENTRADAS da produção de uma placa solar térmica polimérica**

DADOS DE ENTRADA DO INVENTÁRIO DA PRODUÇÃO DE UMA PLACA SOLAR TÉRMICA DE POLICABONATO					
ENTRADA		QUANTIDADE	UNIDADE	MÓDULO DO ECOINVENT®	MEMORIAL DE CÁLCULO
1	Módulo Policarbonato.	4,800	kg	Polycarbonate{GLO} market for Cut-off,U	Quantidade de módulo de policarbonato utilizada para fazer uma placa solar térmica, placa de 5mm.
2	Tubo PVC 32mm	0,480	kg	PVC pipe E	Encanamento utilizado para condução da água do módulo de policarbonato.
3	Cola PVC	0,080	kg	Polyvinylchloride, emulsion polymerised {GLO}  market for   Cut-off, U	Adesivo plástico utilizado para fixar os tubos e conexões de PVC.
4	Tinta Eletrostática	0,289	kg	Electrostatic paint {GLO}  market for   Cut-off, U	Tinta eletrostática (automotiva) utilizada para pintar os módulos, com a finalidade de aumentar a temperatura interna. Considerando 2 demãos de tinta.
5	Isolante térmico	0,078	kg	Polystyrene foam slab {GLO}  market for   Cut-off, U	Isolante térmico que ajuda no aquecimento da água.
6	Cola de contato	0,05	kg	Liquid epoxy resins E	Cola de contato utilizada para fixar o isolante térmico ao módulo de policarbonato
7	Conexões	0,123	kg	PVC pipe E	Conexões utilizadas para encaminhar a água fria até o módulo e do módulo até a caixa de água que vai armazenar a água quente. Cap. Soldável de 32mm e joelhos de 32mm.

8	Abraçadeira	0,051	kg	Ferrochromium, high-carbon, 68% Cr {GLO}  market for  Cut-off, U	Quantidade de abraçadeiras necessárias para a montagem do módulo.
9	Energia Elétrica	5,000	kWh	Electricity, medium voltage {BR}  market for  Cut-off, U	Média entre a quantidade de kWh gasto médio mensal pela produção média mensal de placas solares.
10	Água	0,050	m <sup>3</sup>	Tap water {RoW}  market for   Cut-off, U	Consumo médio mensal dividido pela produção média mensal de blocos.
11	Transporte	0,214	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO 3 {ROW}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO 3   Cut-off, U	Transporte utilizado para a locomoção dos canos e conexões de PVC.

**Fonte: Autora (2020).**

**Tabela 6 Dado das SAÍDAS da produção de uma placa solar térmica polimérica**

DADOS DE ENTRADA DO INVENTÁRIO DA PRODUÇÃO DE UMA PLACA SOLAR TÉRMICA DE POLICABONATO					
SAÍDAS		QUANTIDADE	UNIDADE	MÓDULO DO ECOINVENT®	MEMORIAL DE CÁLCULO
1	Resíduos plásticos	0,200	kg	Plastic Waste	Resíduos plásticos das embalagens que vão para reciclagem.
2	Placa solar	5,9505	kg	Polymeric thermal solar plate {BR} production Cut-off, U	Placa solar térmica polimérica.

**Fonte: Autora (2020).**

Observando as tabelas acima, percebe-se que considerando a massa de cada entrada pressupõe-se que a principal quantidade de potencial impacto ambiental resultará do módulo de policarbonato, pois ele corresponde a 80% da massa total da placa solar.

Entretanto, isso só pode ser confirmado se o indicador de impacto ambiental apresentar esse dado, ou seja, por maior porcentagem do total que um insumo representa não se pode afirmar que esse é o item que mais impacta ambientalmente no total do processo. Dessa forma, a composição de um componente pode agregar mais potencial impacto ambiental em um sistema do que a quantidade.

### 3.4 ANÁLISE DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA (AICV)

A etapa de avaliação dos potenciais impactos ambientais é o terceiro passo para a avaliação de um produto ou processo, relacionando sempre cada passo a interpretação dos resultados e indicativos.

#### 3.4.1 Métodos de AICV

A escolha dos métodos de análise do AICV foi feita com o intuito de relacionar os indicadores com categorias de impactos ambientais, seguindo as recomendações da NBR ISO 14.025 (ABNT, 2015) e pela EN 15.804 (CEN, 2019). De acordo com as especificações apresentadas no item 3, será apresentado na Tabela 7 o quantitativo total de impactos relacionados à placa solar térmica que possui unidade funcional “Fornecer 62,5 l de água aquecida à 60 °C” com os métodos e categorias de impactos utilizados.

**Tabela 7 AICV de uma placa solar térmica polimérica**

MÉTODOS DE AICV	CATEGORIAS DE IMPACTO	QUANTIDADE	UNIDADE
CML	Depleção potencial de recursos abióticos – não fósseis	5,94E-06	kg Sb eq.
	Depleção potencial de recursos abióticos – combustíveis fósseis	8,96E+01	MJ
	Potencial de aquecimento global – GWP100 anos	7,57E+00	kg CO <sub>2</sub> eq.
	Potencial de destruição da camada de ozônio	6,24E-08	kg CFC-11 eq.

Potencial de toxicidade humana	3,55E+00	kg 1,4-DB eq.
Potencial de ecotoxicidade - aquático de água doce.	5,41E-01	kg 1,4-DB eq.
Potencial ecotoxicidade marinha aquática	1,64E+03	kg 1,4-DB eq.
Potencial ecotoxicidade terrestre	2,64E-02	kg 1,4-DB eq.
Potencial de oxidação fotoquímica	1,48E-03	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.
Potencial de acidificação do solo e água	2,48E-02	kg SO <sub>2</sub> eq.
Potencial de eutrofização	2,87E-03	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq.

Fonte: *software SimaPro® (2021)*.

Com referência aos dados apresentados na Tabela 6, observa-se que são apresentados dados gerais ao processo analisado, ou seja, cada categoria indica um potencial impacto ambiental com a sua respectiva unidade de referência. Como as categorias não são comparáveis entre si, é necessário analisar qual a participação de cada fluxo de entrada do processo analisando sua implicação na categoria de impacto.

Sendo assim na Figura 15 é apresentado qual a participação de cada fluxo do sistema nas categorias de impacto, relacionados ao método CML, distribuídos em forma de porcentagem para facilitar o entendimento e análise.

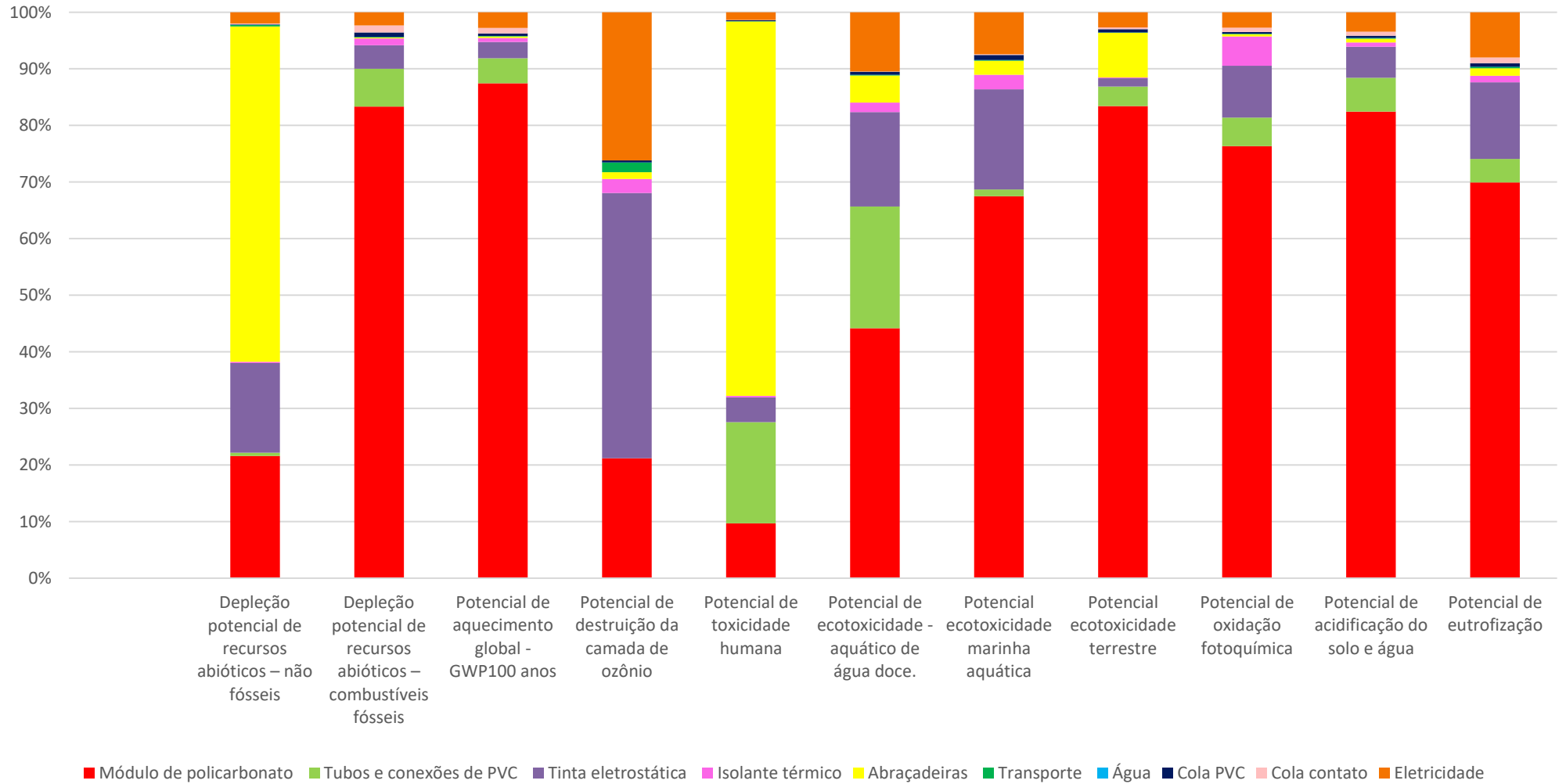
Das categorias de impacto que podem ser comparadas entre si, ou seja, que possuem as mesmas características de cálculo e unidade de referência, sendo elas: potencial de ecotoxicidade - aquático de água doce, marinha aquática e terrestre, percebe-se que a que possui maior quantidade indicativa de impacto é a marinha aquática.

Para verificar quais componentes são os maiores responsáveis por esse potencial de impacto, observa-se a Figura 15, que indica o módulo de policarbonato (67,47%), tinta eletrostática (17,70%) e a eletricidade (7,41%).

Como esse impacto está relacionado em decorrência das emissões de substâncias tóxicas para o ar, a água e o solo, pode-se associar o indicativo do módulo de policarbonato e a tinta eletrostática pela sua composição com compostos químicos tóxicos, mesmo sendo utilizados em pequenas quantidades.

Figura 15 Gráfico da participação (%) de cada entrada na AICV para o módulo do CML

GRÁFICO DA PARTICIPAÇÃO (%) DAS ENTRADAS NA AICV



Fonte: autoria própria (2021).



Após a compilação de dados no software Simapro®, é possível analisar os principais impactantes em cada categoria, e qual o fluxo que mais possui impacto no sistema total.

Dessa forma, analisando a categoria depleção potencial de recursos abióticos – não fósseis, as abraçadeiras metálicas apresentam o maior peso no potencial de impacto (59,26%). Como esta categoria está ligada à extração de minerais e a composição dessas abraçadeiras é uma liga de Ferro-Cromo com alto teor de Carbono, o indicativo é coerente com o fluxo. Já o módulo de policarbonato (21,68%) e a tinta eletrostática (15,85%), correspondem aos outros dois principais impactantes deste módulo.

Para a categoria de depleção potencial de recursos abióticos – combustíveis fósseis apresenta o módulo de policarbonato (83,35%) como principal impactante, em segundo os tubos e conexões de PVC (6,69%) e terceiro a tinta eletrostática (4,12%). Era esperado que o fluxo de transporte apresentasse um alto valor de impacto, entretanto apresentou um peso de 2,33%.

O potencial de aquecimento global – GWP100 anos, está ligado diretamente às emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera, relacionando o kg de dióxido de carbono / kg de emissão. Com o maior indicativo sendo o módulo de policarbonato (87,45%), pode-se afirmar que esse é o fluxo que possui maior implicação nas alterações climáticas, relacionando também a sua proporção da massa total da placa solar térmica que é de 80%.

A Categoria de potencial de destruição da camada de ozônio indica a tinta eletrostática (46,81%) como principal impactante, como está relacionada diretamente a emissão de diferentes gases, o indicado condiz com o proposto da categoria, visto que a tinta eletrostática é um composto de resinas vinílicas, epóxi, fenólicas, cargas minerais, pigmentos e aditivos solventes.

Como potencial de toxicidade humana, era esperado que os indicativos apresentassem a tinta eletrostática, a cola de contato ou a cola de PVC como principais impactantes, entretanto as abraçadeiras metálicas (66,15%) e os tubos e conexões de PVC (17,87%) indicaram maiores impactos.

Analisando as categorias de potencial de ecotoxicidade aquático de água doce, marinha aquática e terrestre, nota-se que elas apresentam o mesmo padrão de principal impactante sendo ele o módulo de policarbonato (44,18 %, 67,43% e 83,40%,

respectivamente). A tinta eletrostática também apresenta influência significativa nas duas primeiras categorias (16,70% e 17,70), enquanto na terrestre as abraçadeiras metálicas apresentam impacto significativo (7,93%).

O potencial de oxidação fotoquímica que é expresso em kg equivalentes de etileno / kg emissão indica que o módulo de policarbonato (76,35%) apresenta formação de substâncias reativas que são prejudiciais à saúde humana e aos ecossistemas. Além disso, também apresenta a tinta eletrostática (9,14%) e o isolante térmico (5,20%) como potenciais impactantes.

Para o potencial de acidificação do solo e água expressos como kg SO<sub>2</sub> equivalentes / kg emissão indica que o módulo de policarbonato (82,46%) e os tubos e conexões de PVC (5,98%) são os principais impactantes, ou seja, indica que esses dois fluxos causam uma ampla variação de impactos no solo, água, organismos e ecossistemas.

Da mesma forma, é o que acontece para a categoria de potencial de eutrofização, expresso em kg PO<sub>4</sub> equivalentes por kg de emissão, indicando o módulo de policarbonato (69,91%) e a tinta eletrostática (13,54) como principais impactantes.

Analisando de forma geral que o módulo de policarbonato é o principal impactante de todo o sistema, esse fato pode ser atribuído também a sua grande massa na totalidade da placa solar térmica.

Outra questão é que dos componentes que poderiam ter uma maior quantidade de emissões e resíduos químicos, sendo eles a tinta eletrostática, cola de PVC e a cola de contato, apenas a tinta eletrostática se mostrou com índice elevado de potenciais impactos.

A Cola PVC e a cola de contato apresentaram uma máxima de 1,23% da responsabilidade de potencial impacto de todas as categorias. Pode-se assumir que esses dois componentes poderiam ser cortados da análise total, entretanto sua presença na análise é importante devido aos seus componentes, mesmo com seu baixo peso (%).

A eletricidade apresenta uma significância de 26,19% na categoria de potencial destruição da camada de ozônio, esse fato pode ser associado que a energia analisada é a de hidroelétricas, que acarretam grande impacto ambiental para sua instalação, mesmo sendo uma das formas de energia limpa. Além disso, a eletricidade

apresenta uma porcentagem significativa em todas as categorias de impacto, mesmo sendo contabilizada ele apenas na produção das placas solares. Como citado anteriormente, os outros fluxos analisados não foram adaptados para a utilização dessa fonte de energia. Dessa forma o impacto da energia poderia ser ainda mais significativo.

### 3.5 DISCUSSÕES

Das premissas adotadas com a revisão bibliográfica de ACV de placas solares térmicas, assumiu-se que como a grande maioria dos estudos que abrangiam todo ciclo de vida, apresentaram que a maioria dos impactos eram relacionados à produção, foi analisada somente a produção da placa solar térmica.

Como exemplo, analisando a pesquisa de Milousi et. al. (2020) percebe-se que quando um sistema de placas solares térmicas é estudado, abrangendo toda a vida desses sistemas, o potencial impacto ambiental mais pronunciado se refere a produção dessas placas, mesmo variando o tipo de tecnologia empregadas as mesmas. Esses resultados nos apresentam a importância de estudar detalhadamente o processo produtivo das placas, sabendo que durante a vida útil desses sistemas tem-se baixo impacto ambiental.

Assumindo as metodologias mais utilizadas também relacionadas a bibliografia, considerando as normas destinadas a produtos da construção civil, utilizou-se da metodologia do CML. As categorias analisadas foram descritas e distribuídas em cada potencial de impacto para a sua relação com os fluxos do sistema.

Como a maioria dos estudos é destinada às tecnologias convencionais, houve uma certa dificuldade de encontrar relações dos resultados com estudos de placas compostas por materiais não convencionais, as encontradas utilizaram materiais como PET e PVC.

Fazendo a relação das placas compostas por materiais convencionais (vidro e cobre) com as não convencionais (PET, PVC e policarbonato) relata-se que os materiais base, ou seja, que possuem maior massa no total do sistema acarretam

como principais potenciais impactantes da maioria das categorias de impacto analisadas.

Esse fato mostra-se presente na pesquisa de Arantes (2008) que estudou o ciclo de vida de placas solares produzidas com materiais convencionais e não convencionais e encontrou como principais impactantes o cobre, PET e PVC, os maiores contribuintes nas categorias de impacto.

O mesmo acontece nas pesquisas de Alberti et. al. (2019) e košičan et. al. (2021) que apresentam o cobre e os demais principais componentes das placas solares como principais impactantes.

O fato de cada pesquisador indicar um componente como principal impactante, nos remete a concentração desse impacto relacionado ao tipo de tecnologia analisada e ao tipo de material componente da placa. Ou seja, quando a placa solar for constituída de material convencional ou não convencional, seu principal impacto será relacionado ao seu componente principal.

Esse fato se reforça nessa pesquisa, visto que o módulo de policarbonato é o principal impactante de oito das onze categorias de impactos analisadas, sendo considerada uma tecnologia não convencional e de baixo custo (cerca de 1/3 do valor de sistemas convencionais).

Outro ponto a se discutir é que a utilização da radiação solar como fonte de energia renovável, retoma a questão da sustentabilidade. De toda forma, mesmo as placas solares possuírem algum impacto ambiental, elas ainda possuem valor sustentável, e quanto mais aprimoradas forem às tecnologias e às composições, melhor será seu desempenho para o meio ambiente.

As limitações do estudo englobam a falta de dados estatístico devido ao fechamento da fábrica, a desconsideração do descarte de materiais como as lixas, serras, embalagens de tintas e colas. Outra limitação também é o estudo apenas da produção da placa solar térmica, mesmo as pesquisas apresentando que o maior impacto está relacionado a produção, é importante se atentar ao fim de vida desses produtos, ou seja, seu descarte.

Com relação aos objetivos da pesquisa, que eram relacionados a identificação de quais componentes da placa solar térmica em estudo causam mais impactos ambientais de forma geral, concluiu-se que são o módulo de policarbonato e a tinta eletrostática.

O outro objetivo está relacionado com os pontos de melhorias e sugestões para a produção da placa solar térmica. Com base no que foi avaliado no objetivo relatando anteriormente, os principais impactos estão relacionados ao módulo de policarbonato e a tinta eletrostática, dessa forma a sugestão de melhorias está relacionada a esses dois itens.

Para o módulo de policarbonato, sugere-se que seu destino final seja à reciclagem, fato que vai aumentar a vida do produto, diminuindo assim seu impacto total. Outro ponto é a utilização de colas que não impossibilitem a sua reciclagem, fato que deve ser estudado e analisado.

Além disso, existe a possibilidade da substituição desse módulo de policarbonato por um módulo já reciclado ou composto de material menos impactante, entendendo que deve ser feita a análise para substituição.

Já para a tinta eletrostática, sugere-se a sua troca dessa por outra tinta com menor potencial impactante. Também pode ser incluído outros materiais que aumentem a capacidade de absorção de calor dos módulos.

Outra sugestão de melhoria para o produto final, placa solar térmica, é a utilização de outro material para inserção dos módulos de policarbonato, visto que, os que são utilizados nesse sistema são compostos de PVC com baixa resistência térmica.

Dessa forma foi cumprido todos os objetivos dessa pesquisa, como o principal que era: caracterizar os potenciais impactos ambientais causados pela produção de uma placa solar térmica, produzida na cidade de Pato Branco - PR, composta por material polimérico, destinada a uso residencial e com capacidade de aquecer 62,5 litros de água a 60°C durante o ciclo solar local, associados ao ciclo de vida, identificando as categorias de impacto com contribuição mais significativa nesse sistema.

Uma reflexão importante, é que mesmo o módulo de policarbonato ser o principal potencial impactante ambiental da produção da placa solar polimérica, não é inviabilizado o seu uso, principalmente pelo fator social-econômico, que permite que esse sistema seja instalado em habitações de famílias com potencial econômico baixo, o que viabiliza sua produção e instalação.

Como sugestão para pesquisas futuras, tem-se o estudo de toda vida útil da placa solar térmica polimérica, considerando as variantes de instalação, utilização, reciclagem e fim de vida.

## 4 CONCLUSÃO

O aumento da demanda energética brasileira acarretou a busca de fontes de energia limpas e acessíveis para a população e indústria. Considerando que o Brasil é um país de clima tropical e que possui grande potencial para captação de energia solar, aconteceu uma expansão na exploração desse tipo de fonte de energia.

Considerada uma energia renovável e sustentável, a energia solar, deriva do sol na forma de radiação solar e o principal componente de um sistema de captação solar são os coletores solares.

Nesse contexto, esta pesquisa teve como objetivo caracterizar os potenciais impactos ambientais causados pela produção de uma placa solar térmica, produzida na cidade de Pato Branco - PR, composta por material polimérico, destinada a uso residencial e com capacidade de aquecer 62,5 litros de água a 60°C durante o ciclo solar local, associados ao ciclo de vida, identificando as categorias de impacto com contribuição mais significativa nesse sistema.

A utilização da metodologia de ACV, permitiu avaliar e quantificar os impactos decorrentes da utilização dessa tecnologia solar, bem como concluir se esse tipo de coletor solar é realmente sustentável. Por meio do método CML, foi possível verificar que o módulo de policarbonato apresenta maior potencial impactante em oito das onze categorias de impacto analisando, associando assim esse componente como principal impactante da placa solar térmica.

Esse resultado reforça a bibliografia, de que o principal componente da placa solar, independentemente de ser uma placa solar térmica constituída de material convencional ou alternativo, é o mais impactante.

Como grande benefício de sua utilização, tem-se o fator social –econômico, que permite a sua comercialização e instalação para famílias com baixo potencial econômico.

Dentre as análises, é importante salientar as limitações desse estudo, que prejudicam a análise global do sistema. Sendo elas as descon siderações de descartes de materiais, utilização de dados internacionais, fechamento da fábrica para maiores análises, não consideração de toda vida do produto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14001: Sistema de Gestão Ambiental – Requisitos com orientação para uso. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. NBR 14040: Análise do Ciclo de Vida: Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

\_\_\_\_\_. NBR 14044: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.

\_\_\_\_\_. NBR 14020: Rótulos e declarações ambientais – Princípios Gerais. Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. NBR 14021: Rótulos e declarações ambientais – Autodeclarações ambientais – rotulagem do tipo II. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 14024: Rótulos e declarações ambientais – Rotulagem ambiental do tipo I – princípios e procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 14025: Rótulos e declarações ambientais – Declarações ambientais de Tipo III - Princípios e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. ISO/TR 14049: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida — Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário. Rio de Janeiro, 2014.

ALBERTÍ, J.; RAIGOSA, J.; RAUGEI, M.; ASSIEGO, R.; RIBAS-TUR, J.; GARRIDO-SORIANO, N. 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, 47 (2019), Article 101467



ARANTES, L. O. **Avaliação comparativa do ciclo de vida entre sistemas de aquecimento solar de água utilizados em habitações de interesse social**. 2008. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia Faculdade de Engenharia Civil, Uberlândia, 2008.

ARNAOUTAKIS, N.; SOULIOTIS, M.; PAPAEFHIMIOU, S. **Comparative experimental Life Cycle Assessment of two commercial solar thermal devices for domestic applications**. *Renewable Energy*, v. 111, n 2017, p. 187-200, 2017. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.008>. Acesso em Fevereiro de 2020.

AZAD, E. **Theoretical and experimental investigation of heat pipe solar collector**. Elsevier: Experimental Thermal and Fluid Science, Teerã, 2008.

BARE, J. C.; HOFSTETTER, P.; PENNINGTON, D. W.; UDO DE HAES, H. A. **Midpoints versus endpoints: the sacrifices and benefits**. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 5, n. 6, p. 319-326, 2000.

BENKACIALI, S.; HADDADI, M.; KHELLAF, A. **Evaluation of direct solar irradiance from 18 broadband parametric models: Case of Algeria**. *Renewable Energy*, v. 125, n. 2018, p. 694–711, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.108>. Acesso em: Maio de 2019.

BRENNER, W.; ADAMOVIC, N.A **Circular Economy for Photovoltaic Waste – the Vision of the European Project CABRISS**, 2017. 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, 2017, pp. 146-151. DOI: 10.23919/MIPRO.2017.7973407. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7973407&isnumber=7973374>. Acesso em Maio de 2020

CAMPOLINA, J. M.; SIGRIST, C. S. L.; MORIS, V. A. S. **Uma revisão de literatura sobre softwares utilizados em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental. Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 735-750, mai-ago. 2015.

CARDOSO, R. B.; CAMPOS, O. C. **IMPACTS OF CLIMATE VARIABLES IN ENERGY GENERATION IN THE PHOTOVOLTAIC SYSTEM OF THE UNIFEI, IN ITABIRA CITY**. Revista SODEBRAS, v. 12, p. 295-299, 2017.

CECONI, M. et al. **Solar irradiation numerical modeling as alternative method in evaluating of available energy potential**. Rev. Geogr. Acadêmica, v.4, n.2, p.41-52, 2010.

CEN EN 15804:2012+A2:2019 **Sustainability of construction works—environmental product declarations—core rules for the product category of construction products** (2019).

CENTRO INTERNACIONAL DE REFERÊNCIA EM REÚSO DE ÁGUA - CIRRA. **Avaliação do consumo de insumos (água, energia elétrica e gás) em chuveiro elétrico, aquecedor a gás, chuveiro híbrido, aquecedor solar e boiler elétrico**. Relatório Técnico. São Paulo, 2010. 64p.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise de Ciclo de Vida de Produtos – ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro, Quality Mark Ed. 1998.

CHEN, G.; DOROSHENKO, A.; KOLTUN, P.; SHESTOPALOV, K. **Comparative field experimental investigations of different flat plate solar collectors**. Solar Energy, v. 115, p. 577–588, 2015.

COMODI, G.; BEVILACQUA, M.; CARESANA, F.; PACIAROTTI, C.; PELAGALLI, L.; Venella, P. **Life cycle assessment and energy-CO2-economic payback analyses**

**of renewable domestic hot water systems with unglazed and glazed solar thermal panels.** Appl Energy, 164 (2016), pp. 944-955

**CONSELHO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (CONMETRO).** Resolução nº 04/2010: Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV). 6p. Brasília, 2010.

CURRAN, M. A. **Report on Activity of Task Force 1 in the Life Cycle Inventory Programme: Data Registry – Global Life Cycle Inventory Data Resources.** International Journal Life Cycle Assessment, v. 11, nº 4, p. 284 – 289, 2006.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A.; KLEIN, S. A. **Solar Heating Design by the FChart Method.** New York: John Wiley & Sons, 1977.

FRISCHKNECHT, R; ITTEN, R; SINHA, P; WILD-SCHOLTEN, M; ZHANG, J, 2015. **Life cycle inventories and life cycle assessment of photovoltaic systems.** International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Repost T12, v.5.

GAGNON, L., BÉLANGER, C., & UCHIYAMA, Y. (2002). **Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001.** Energy Policy, 1267–1278

GOEDKOOP M., HEIJUNGS R., HUIJBREGTS M.A.J, De SCHRYVER A., STRUIJS J., VAN ZELM R. **Recipe 2008: a life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and endpoint levels.** First edition. Report i: characterization. The Netherlands: Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (2009).

GOEDKOOP, M.; SCHRYVER, A.; OELE, M.; DURKSZ, S.; de ROEST, D. **Introduction to LCA with SimaPro 7 - Pré Consultants.** 86p. Netherlands, 2010.  
Goedkoop, M.; Spriensma, R. **The Eco-indicator 99: a damage oriented method for life cycle impact assessment – Methodology Report.** Netherlands: Pré Consultants, Junho, 2000. 3ª edição. 132 p. Disponível em: [http://www.pre.nl/download/EI99\\_methodology\\_v3.pdf](http://www.pre.nl/download/EI99_methodology_v3.pdf). Acesso em: Janeiro 2021.

GONZÁLEZ, J. A. C. et al. **Centrales de energías renovables. Generación eléctrica con energías renovables**. Madrid: Pearson Educación S.A., 2009.

GUINÉE, J. B.; HEIJUNGS R.; HUPPES, G. **Life Cycle Assessment: Past, Present and Future**. Environmental Science & Technology, v 45, n.1, pp. 90-96, Iowa, janeiro de 2011.

HANG, Y., QU, M., ZHAO, F., **Economic and environmental life cycle analysis of solar hot water systems in the United States**. Energy Build. 45, 181e188, 2012.

HUIJBREGTS, M.A.J., STEINMANN, Z.J.N., ELSHOUT, P.M.F et al. **ReCiPe 2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level**. Int. J. Life Cycle Assess. 22, 138-147 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>

Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia - IBICT. **Avaliação do ciclo de vida de produtos**, 2007a. Disponível em: [www.acv.ibict.br](http://www.acv.ibict.br). Acesso em: Maio 2021.

IEA-PVPS - **International Energy Agency - Photovoltaics Power Systems Programme**. Snapshot of global photovoltaic markets. Report IEA-PVPS T1-33, 2018 a.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT) / CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Desenvolvimento Sustentável e Avaliação do Ciclo de vida**. 33p. Brasília, 2014.

KELLENBERGER D.; ALTHAUS, H. J.; KÜNNIGER T.; LEHMANN M.; JUNGBLUTH N.; THALMANN P. 914p. **Ecoinvent report no. 7. Life Cycle Inventories of Building Products**. EMPA, Dübendorf, 2007.

KIM, S. IN; KISSICK, J.; SPENCE, S.; BOYLE, C. **Design, analysis and performance of a polymer–carbon nanotubes based economic solar collector**. Solar Energy, v. 134, p. 251–263, 2016.

KORONEOS, C.J.; NANAKI, E.A. **Life cycle environmental impact assessment of a solar water heater**. J Clean Prod., 37 (2012), pp. 154-161

KOŠIČAN, J.; PICAZO, M.Á.P.; VILČEKOVÁ, S.; KOŠIČANOVÁ, D. **Life cycle assessment and economic energy efficiency of a solar thermal installation in a family house**. Sustainability 2021, 13, 2305.

KYLILI, A.; FOKAIDES, P. A; LOANNIDES, A. KALOGIROU, S. **Environmental assessment of solar thermal systems for the industrial sector**. Journal of Cleaner Production, v. 176, p. 2018, pg 99-109, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.150>. Acesso em fevereiro de 2020.

LAMNATOU, Chr. NOTTON, G., CHEMISANA, D., CRISTOFARI, C. **The environmental performance of a building-integrated solar thermal collector based on multiple approaches and life-cycle impact assessment methodologies Build. Environ.**, 87 (2015), pp. 45-58.

LORRETO, A. C.; BECKER JUNIOR, A. M.; LOPEZ, D. A. R.; RODRIGUEZ, A.A. L. **Avaliação da eficiência térmica e do potencial de impactos ambientais de sistemas de aquecimento solar de água produzidos a partir de materiais alternativos**. In: gcv 2018 : Congresso brasileiro sobre gestão do ciclo de vida : Brasília-DF 17 a 20 de junho de 2018, 6., 2018, Brasília. Anais do VI Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida. Brasília: 2018. p. 326-331. Disponível em: <[https://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2018/08/Anais\\_GCV2018.pdf](https://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2018/08/Anais_GCV2018.pdf)>. Acesso em: 17 fev. 2021.

MACEDO, D. B. G. **Metodologia de avaliação do ciclo de vida de sistemas construtivos: aplicação em um sistema estruturado em aço**. 2011. 265p. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

MAHMUD, M.A.P.; HUDA, N.; FARJANA, S.H.; LANG, C. **Environmental Impacts of Solar-Photovoltaic and Solar-Thermal Systems with Life-Cycle Assessment.** *Energies* **2018**, 11, 2346. <https://doi.org/10.3390/en11092346>

MAHMUD, M.A.P.; HUDA, N.; FARJANA, S.H.; LANG, C. **Environmental life-cycle assessment and techno-economic analysis of photovoltaic (PV) and photovoltaic/thermal (PV/T) systems.** 2018 IEEE international conference on environment and electrical engineering and 2018 IEEE industrial and commercial power systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe) (2018), pp. 1-5

**Manual do Sistema ILCD** – Sistema Internacional de Referência de Dados do Ciclo de Vida de Produtos e Processos. 318p. Brasília, 2014.

MARTINOPOULOS, G.; TSILINGIRIDIS, G.; KYRIAKIS, N. **Identification of the environmental impact from the use of different materials in domestic solar hot water systems.** *Appl Energy*, 102 (2013), pp. 545-555

MARTINS, F.R.; PEREIRA, E. B. **Estudo comparativo da confiabilidade de estimativas de irradiação solar para o sudeste brasileiro obtidas a partir de dados de satélite e por interpolação/extrapolação de dados de superfície.** *Revista Brasileira de Geofísica*, São José dos Campos, SP, v. 29, p.265-276, 2011. Disponível em: <[www.scielo.br/rgb](http://www.scielo.br/rgb)>. Acesso em: 27 de maio de 2019.

MILOUSI, M.; ARAMPATZIS, G.; PAPAETHIMIOU, S. **Evaluating the environmental performance of solar energy systems through a combined life cycle assessment and cost analysis.** *Sustainability*, 11 (9) (2019), p. 2539

MILOUSI, M.; SOULIOSTIS, M.; PAPAETHIMIOU, S. **Economic and environmental impacts of solar thermal technologies through life cycle assessment.** 1<sup>st</sup> International Conference on Environmental Design (ICED 2020). Athens, Greece. 24-25 October, 2020.

MME, **Ministério de Minas e Energias** “Balanço Energético Nacional 2020: ano base 201916 - Relatório Síntese”, 2020 Disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em: 24 de maio de 2020.

MONTOYA, J. R. **Desarrollo de una metodología dentro de la fase de ecodiseño en el proceso de fabricación e instalación de placas solares térmicas mediante modelos de análisis ambiental según la metodología ACV, caso práctico**, 2012. Dissertação de Mestrado.

NASCIMENTO, R. L. **Energia solar no Brasil: situação e perspectivas**. Câmara dos Deputados, Consultoria Legislativa, 2017.

PEREIRA, E. M. D.; DUARTE, L. O. M.; PEREIRA, L. T.; FARIA, C. F. da C. **Energia Solar Térmica**. In: TOLMASQUIM, M. T. (org), Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2003.

PEREIRA JUNIOR, L., C. **A interação entre geradores solares fotovoltaicos e veículos elétricos conectados à rede elétrica pública**. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPREL-CRESESB, 2014.

Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA ou UNEP. **Life Cycle Initiative – Guidance on Organizational Life Cycle Assessment**. Nações Unidas, 2015. Disponível em: < [http://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2015/04/olca\\_24.4.15-web.pdf](http://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2015/04/olca_24.4.15-web.pdf)>. Acesso em jan. 2020.

PROCOBRE – INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE. **Qualidade em instalações de Aquecimento Solar: Boas Práticas**. São Paulo, 2009.

RÜTHER, Ricardo. **Relatório da sessão “Energias alternativas e potencial da energia solar fotovoltaica no Brasil.”** Parc. Estrat. Ed. Esp. Brasília-DF, v.15, n.31, p.273-286, Jul-Dez. 2010

SANTIAGO, L. **Histórico sobre ACV.** 2005. Disponível em <http://exportacv.ibict.br/acv/sobre/historico.htm>. Acesso em Out. de 2019.

SHC-IEA — SOLAR HEATING & COOLING PROGRAMME - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (SHC-IEA). **Solar Heat Worldwide – Markets and Contribution to the Energy Supply 2013.** Ed. 2015.

SOULIOTIS, M.; PANARAS, G.; FOKAIDES, P.A. **Solar water heating for social housing: energy analysis and Life Cycle Assessment.** Energy Build., 169 (2018), pp. 157-171

SUMAN, S.; KHAN, M.K.; PATHAK, M.. **Performance enhancement of solar collectors—A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 49, p. 192-210, 2015.

TORGAL, F. P.; JALALI S. **A sustentabilidade dos materiais de construção.** TecMinho, 2010.

VASCONCELOS, L., E., M.; LIMBERGER, M., A., C. **Energia Solar para aquecimento de água no Brasil: Contribuições da EletrobrasProcel e Parceiros.** Rio de Janeiro: Eletrobras, 2012. 240 p.

VASQUEZ, D., V.; USON, A., A; BRIBI, I., Z.; JANEZ, A.; SASTRESA, E., L.; HERNANDEZ, P.; ARRIZABALAGA, E. **Environmental assessment of domestic solar hot water systems: a case study in residential and hotel buildings.** J. Clean. Prod. 88, 29 e 42, 2015.

TIEPOLO, G. M.; URBANETZ JR, J.; PEREIRA, E. B.; PEREIRA, S. V.; ALVES, A. R. **Potencial de Geração de Energia Elétrica Através de Sistemas Fotovoltaicos**



**Conectados à Rede no Estado do Paraná – Resultados Parciais.** Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, Belo Horizonte, 2016

**TURCONI, R., BOLDRIN, A., & ASTRUP, T. Life Cycle Assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 555–565, 2013.**

## ANEXO A

QUESTIONÁRIO UTILIZADO PARA COLETA DE DADOS	
Fabricante:	Sustentabil Energias LTDA
Endereço:	Bairro Fraron, Pato Branco
Contato:	
Data da Visita:	18 de setembro de 2019
Pesquisadores:	Andressa Milanez

Quanto de cada componente é necessário para a fabricação de uma placa?	
Como é feita a escolha do tipo de reservatório para a água quente?	De acordo com o Usuário
Qual a fabricação mensal da empresa?	Ainda não mensurável Meta inicial de 80 placas mês

DADOS GERAIS DE CONSUMO (MENSAL)			
Itens de consumo	Mês	Unidade	Observações
<b>FONTES DE ENERGIA</b>			
Energia elétrica		kWh	50kW
Gás Natural		m <sup>3</sup>	não
GLP		kg	não
Diesel		L	não
<b>FONTES DE ÁGUA</b>			
Rede de abastecimento		m <sup>3</sup>	5
(OUTRA)		m <sup>3</sup>	

TRANSPORTES DOS ITENS DE CONSUMO				
MATERIAS PRIMAS				
Nessa tabela você deve preencher de acordo com a quantidade que compra				
Especificação	Distância até fabrica	Tipo de transporte	Carga por viagem	Observação
Cano PVC	590 km	Rodoviário	70	Representante
Placa de policarbonato	870 km	Rodoviário	90	Representante
Tinta Automotiva	5km	Loja pato Branco	32	
Vedante Polímero	650km	Rodoviário		Representante
Adesivo colante	590 km	Rodoviário	70	Representante
Solventes	5km	Loja pato Branco	100	
Conexões	590 km	Rodoviário	70	Representante
OUTROS				

MATERIAIS DE MANUTENÇÃO (óleos lubrificantes, peças de reposição...)						
Tipo de material de manutenção	Quant. Aplicada/ unidade	Conteúdo da embal.	Origem (cidade)	Transporte	Carga por viagem	Obs.
Troca de óleo veículos	Consumo de óleo por mês?					
Engraxamento das máquinas	Consumo de graxa por mês?					
OUTRO						

RESÍDUOS						
Destinação	Resíduos	Quant. Retirada/tempo	Destino (cidade)	Tipo Transporte	Carga por viagem	Obs.
Aterro sanitário						
Aterro de resíduos inertes						
Incineração						
Reciclagem		20 kg/ mês	Pato Branco			São depositados em container de coleta
OUTROS						

EMISSÕES PARA O AR	
Há algum tipo de emissão direta para o ar decorrente do processo de produção?	Não
EMISSÃO PARA A ÁGUA	
Há algum tipo de emissão direta para a água decorrente do processo de produção?	Não
OUTRAS QUESTÕES	
Como é transportadas as placas até o local de instalação	Veículos de transporte pequenos
	60 °C

Até quantos Graus a placa esquenta a água?	
Qual a vida útil das placas?	10 anos
Precisa manutenção? Se sim de quanto em quanto tempo?	Revisão de pintura a cada 2 anos
Qual a recomendação de instalação das placas, por pessoas, m <sup>2</sup> de residência?	4 placas / família de 4 pessoas
Após o uso qual o destino final das placas? Reciclagem?	Reciclagem