

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LARYSSA AKEMI TAKII

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA DE PAINÉIS
SOLARES FOTOVOLTAICOS USANDO A METODOLOGIA DE ACV**

CURITIBA

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LARYSSA AKEMI TAKII

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA DE PAINÉIS
SOLARES FOTOVOLTAICOS USANDO A METODOLOGIA DE ACV**

Artigo apresentado como requisito parcial à conclusão do curso de Especialização de Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Marcell Mariano
Corrêa Maceno

CURITIBA

2019

AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS USANDO A METODOLOGIA DE ACV

Laryssa Akemi Takii

Resumo

Este artigo teve como objetivo avaliar o impacto ambiental gerado por painéis solares fotovoltaicos (PSF) através da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) em uma abordagem do berço ao túmulo. Para isso, foram seguidas as recomendações das normas vigentes ISO (*International Standards Organisation*) para ACV, para realização das principais etapas desta metodologia. Foram utilizados o software SimaPro v. 9.0.0 para a modelagem dos painéis em relação aos seus impactos ambientais, o Ecoinvent v.3.1 como base de dados do inventário e o método de avaliação IMPACT 2002+ para a obtenção de resultados de impactos ambientais. A simulação mostrou que o maior impacto no ciclo de vida dos PSF é durante a fase de manufatura, onde há o consumo de energia para a fabricação dos componentes. Além disso, foi constatado que no cenário de descarte em que ocorre a reciclagem das partes metálicas e do vidro do PSF há uma melhoria de desempenho ambiental.

Palavras-chave: Análise de Ciclo de Vida. ACP. Painel Solar Fotovoltaico. Impactos Ambientais.

Abstract

This article aimed to evaluate the environmental impact generated by photovoltaic solar panels (PSP) through the Life Cycle Assessment (LCA) methodology in a cradle to grave approach. For this, it was follow the current International Standards Organization (ISO) for ACV were followed to carry out the main steps of this methodology. The software SimaPro v. 9.0.0 for the modeling of panels in relation to their environmental impacts and the IMPACT 2002+ assessment method for obtaining environmental impact results. The simulation showed that the greatest impact on the PSP life cycle is during the manufacturing phase, where there is the energy consumption for the manufacturing of the components. In addition, it was found that in the scenario of disposal in which the recycling of the metal parts and the PSF glass occurs, there is an improvement in environmental performance.

Keywords: Life Cycle Assessment. LCA. Photovoltaic Solar Panels. PV Panels. Environmental Impacts.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a preservação do meio ambiente se tornou uma preocupação, e a busca por fontes renováveis teve uma demanda maior, principalmente na geração de energia elétrica à partir de uma fonte solar. Embora tenha um custo mais elevado, as fontes renováveis tornam-se mais competitivas na medida em que se expandem. No Brasil, a geração de energia a partir de uma fonte solar tem um grande potencial, visto que os níveis de irradiação solar são superiores quando comparados com outros países, como Alemanha, França e Espanha (Nascimento, 2017).

A utilização da energia solar fotovoltaica proporciona diversos benefícios, tanto do ponto de vista elétrico como ambiental. De acordo com ASBOLAR (2016), do ponto de vista elétrico contribui para diversificação da matriz, aumento da segurança no fornecimento e redução de perdas. Sob o aspecto ambiental, há a redução da emissão de gases de efeito estufa, da emissão de materiais particulados e do uso de água para geração de energia elétrica.

Nos últimos anos verificou-se um notável crescimento na utilização de painéis solares, ocasionando um aumento de 395% na produção primária de energia solar no mundo, entre 2003 e 2013. No Brasil, os investimentos vêm crescendo, saindo de US\$ 6 milhões em 2009 para US\$ 562 milhões em 2015 e atingindo o recorde de US\$ 985 milhões em 2016. Dado esses valores, estima-se que a quantidade de painéis solares em 2050 chegará a 9,57 milhões de toneladas (MME, 2016).

A energia solar fotovoltaica muitas vezes é considerada fonte de energia completamente limpa, visto que não há emissão de CO₂ na geração de energia elétrica, porém, a falta de estudos de reciclagem dos resíduos sólidos gerados estão causando preocupações, e segundo (McDonald, 2010) a quantidade desses resíduos irá se acumular drasticamente em 2030, visto que a indústria de painéis solares teve um enorme crescimento na última década.

Devido à esses fatores é importante realizar estudos que investiguem todos os processos envolvidos durante a vida útil do módulo fotovoltaico. Nesse contexto, a análise do ciclo de vida se apresenta como uma ferramenta útil em direção ao

desenvolvimento sustentável, já que a mesma busca diagnosticar pontos de redução dos impactos ambientais causados por determinado produto durante toda sua vida, desde a fabricação até o pós-consumo.

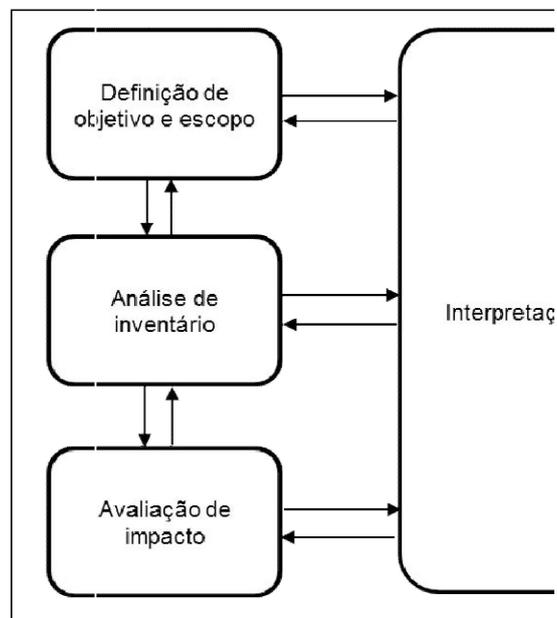
Desta forma, o objetivo deste artigo foi avaliar o potencial impacto ambiental gerado por painéis fotovoltaicos através da ferramenta de Análise de Ciclo de Vida (ACV).

2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

Ciclo de vida é definido como os estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição de matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final. Já a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), é definida como sendo a “compilação e avaliação das entradas, saídas e impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida” (ABNT, 2009) e é regida pela série de Normas ISO 14040.

A ACV é dividida em quatro fases, sendo elas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados (Figura 1).

FIGURA 1- ESTRUTURA DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.



Fonte: Adaptado de ABNT (2009).

A primeira fase é a definição do objetivo e do escopo, sendo que o objetivo deve primeiramente conter a aplicação da ACV, as razões pretendidas, o público-alvo ao qual se destina o estudo e a intenção de divulgação pública dos resultados. Após definir o objetivo, deve-se estabelecer o escopo, que consiste nos limites em que o estudo é válido, dentre os quais se destacam: a unidade funcional, o fluxo de referência, as fronteiras e o sistema do produto, informações relativas aos dados (como alocação, requisitos dos dados) e à avaliação de impacto de ciclo de vida (como a seleção de categorias de impacto). No escopo é interessante ressaltar que a metodologia ACV possui diferentes abordagens e nomenclaturas que diferem de acordo com os processos estudados.

Na segunda fase, é feita a Análise de Inventário do Ciclo de Vida. Essa, engloba a coleta de dados e procedimentos de cálculos para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto. O ICV é realizado como um processo iterativo, assim, à medida em que os dados são coletados, novos requisitos ou limitações dos dados podem ser identificados.

Em seguida, na terceira fase, é realizada a avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), a qual consiste em relacionar os resultados dos ICVs às categorias de impacto (mudanças climáticas, acidificação, perda de biodiversidade, entre outros). (ADISSI *et al.*, 2013).

A Interpretação está presente em todas as fases, entretanto, em uma última etapa da ACV, verificam-se os resultados em relação ao escopo. Um dos itens mais comuns dessa fase consiste em avaliar a contribuição, seja dos processos, seja dos fluxos elementares, no resultado final. (ADISSI *et al.*, 2013).

A ACV pode ser utilizada para diversos fins como, por exemplo, o desenvolvimento, melhoria e comparação de produtos, a definição de planejamento estratégico e políticas públicas, gestão de impactos ambientais de produtos e serviços e marketing ecológico. Observa-se que a ferramenta em questão é, também, um importante fator competitivo na medida em que direta ou indiretamente pode ser utilizada para redução de custos e melhoria da imagem de uma empresa no que se refere ao fator ambiental.

Utilizando a metodologia de ACV é possível ter conhecimento dos maiores geradores de impactos para o meio ambiente durante todo o processo de produção e uso dos painéis solares fotovoltaicos. Com esses resultados podem ser feitos estudos e análises para futuras melhorias.

3. PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS

Segundo a ANEEL (2016), o aproveitamento da iluminação natural e do calor para aquecimento de ambientes decorre da penetração ou absorção da radiação solar nas edificações, reduzindo-se, com isso, as necessidades de iluminação e aquecimento. Dessa forma, um melhor aproveitamento da radiação solar pode ser feito com o auxílio de técnicas mais sofisticadas de arquitetura e construção.

A radiação solar pode ser usada como fonte de energia térmica, para aquecimento de ambientes e de fluidos e para geração de potência mecânica ou elétrica, ou convertida diretamente em energia elétrica, por meio de efeitos sobre materiais, como o termoelétrico e fotovoltaico. O efeito fotovoltaico decorre da excitação dos elétrons de alguns materiais na presença de luz solar. Entre os materiais mais adequados para a conversão de radiação solar em energia elétrica destaca-se o silício (ANEEL 2016).

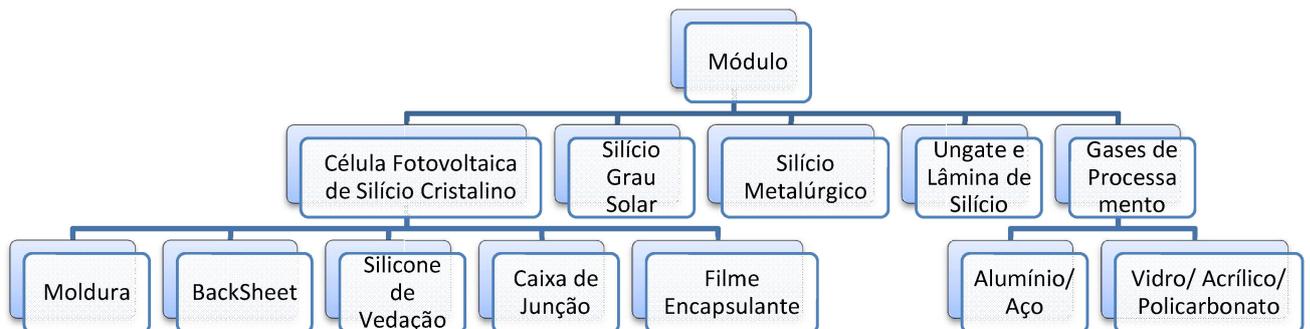
Os painéis solares fotovoltaicos mais tradicionais, também chamados de PSF de 1ª geração, são compostos por wafers de silício monocristalino ou multicristalino. A primeira apresenta uma estrutura de cristal homogênea com maior eficiência na conversão de energia, já a segunda possui estrutura não homogênea e uma eficiência menor, mas por consumirem menos energia no processo produtivo são mais acessíveis (RAMOS ET AL, 2018).

Os sistemas fotovoltaicos são compostos por módulos, inversores, dispositivos de proteção, sistemas de fixação e suporte de módulos, cabos e, opcionalmente, baterias e controles de cargas. A composição dos PSFs varia de acordo com a geração tecnológica, de acordo com Wambach et al. (2006) e IRENA (2016), os painéis da 1ª geração são compostos por 76% de vidro, 10% de polímeros, 8% de alumínio, 5% de silício, 1% de cobre, 0,1% de prata além de

pequenas quantidades de demais metais. Tamaro et al. (2015) apresentou as seguintes faixas de porcentagens explicar a composição de painéis solares de 1ª geração: vidro especial (60% a 75%), célula fotovoltaica de silício (3%), moldura de alumínio (10% a 25%), encapsulante de polímero EVA (6% a 8%), blacksheet PVF (0,1% a 2%), caixa de junção (1%) e outros contatos metálicos - cromo, prata e cobre – (0,1% a 1%). Já para Olson et al. (2013) a composição de um painel solar em função de sua massa ocorre da seguinte forma: 69% de vidro especial, 3% de wafer de silício, 11% do polímero EVA, 11% de moldura de alumínio, 4% de polímero PVF (Fluoreto de polivinila) no blacksheets, 1% de caixa de junção e 1% de cobre.

Os módulos fotovoltaicos de silício cristalino são produzidos de acordo com os materiais e componentes esquematizados na cadeia de valor representada pela figura 2.

FIGURA 2 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS - BENS DA CADEIA DE VALOR.



Fonte: Adaptado de Ramos (2018).

A energia solar fotovoltaica já é uma fonte bem desenvolvida tecnologicamente para produção de energia, porém ainda existem desafios para que essa fonte seja implantada com menores obstáculos. Muitas vezes essa tecnologia é considerada fonte de energia completamente limpa, ainda que os resíduos sólidos gerados sejam ignorados ao fim de suas vidas úteis. Ao contrário de outros produtos, os resíduos de painéis fotovoltaicos levam de 25 a 30 anos para serem

descartados, e por essa razão acabam sendo esquecidos pelo fabricante (EPIA, 2009).

A produção de energia elétrica por células fotovoltaicas tem baixo impacto ambiental, visto que não há emissão de CO₂ na geração de energia elétrica, porém ainda não existem estudos de reciclagem ou tecnologia para reuso das células de silício, de vidro, de alumínio e até da película de EVA (Abinee, 2012). A quantidade desses resíduos irá se acumular drasticamente em 2030, visto que a indústria de painéis solares teve um enorme crescimento na última década (McDonald, 2010).

Já Inatomi e Udaeta (2008) apontam que os principais impactos ambientais negativos da fonte de energia solar são as emissões de produtos tóxicos durante o processo da matéria prima, os riscos associados aos materiais tóxicos (como o arsênio, gálio e cádmio) e, por último, a necessidade de se disporem e reciclarem corretamente as baterias e outros materiais tóxicos.

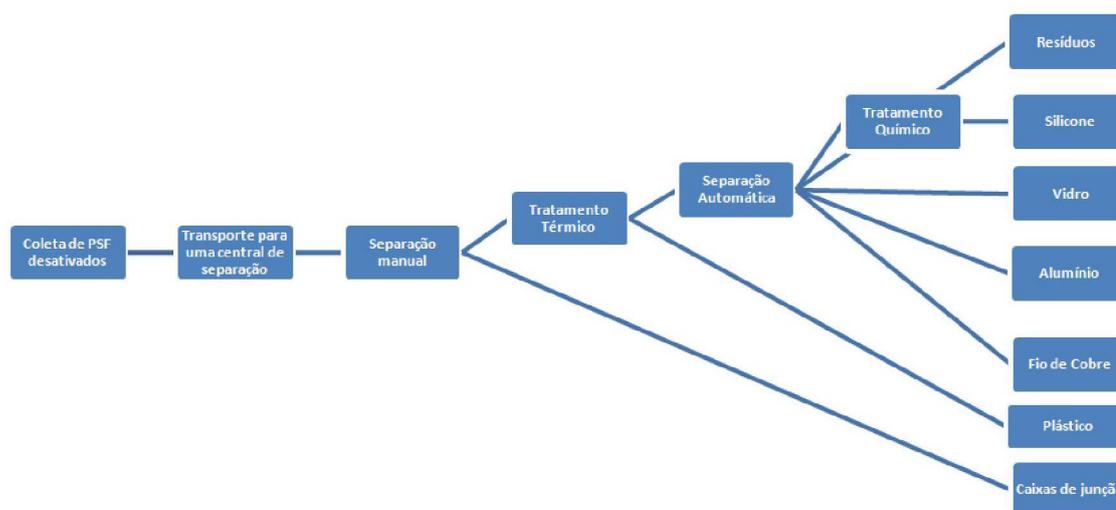
Cada um dos processos dentro da fabricação de um módulo fotovoltaico possui suas características, métodos de produção, necessidades energéticas diferentes, e cada um oferece um certo risco ao meio ambiente. A mineração, por exemplo, acarreta na modificação de toda uma área geográfica que são irreversíveis ao meio ambiente. Os fornos utilizados no processo de redução do silício consomem grandes quantidades de eletricidade e combustíveis fósseis que durante sua queima geram grandes quantidades de gases e poluição. O pó de sílica pode causar doenças às pessoas que o manipulam, assim como os materiais químicos tóxicos utilizados para a purificação do silício. Esses são impactos gerados apenas pelo silício, ainda existem outros componentes como o vidro, alumínio, e diversos tipos de polímeros, fios de cobre e outros elementos que possuem suas particularidades e seus efeitos negativos ao meio ambiente (Oliveira, 2008).

O desenvolvimento dessa tecnologia exige a formação de mão de obra qualificada para a adequada projeção, instalação e manutenção dos sistemas e tratamento dos resíduos. Como a vida útil desses equipamentos é relativamente pequena, esses são desafios para que após alguns anos de uso, os componentes que atingiram o fim da vida útil possam ser trocados ou feitos uma manutenção adequada, afim de diminuir o descarte desses materiais (Abinee et al. 2012).

A motivação econômica para reciclar a maioria dos dispositivos fotovoltaicos não supera a diferença entre a reciclagem e os custos do aterro, tornando assim a reciclagem uma opção economicamente desfavorável e sem incentivos adequados. Porém, como o resíduo fotovoltaico aparece 25-30 anos depois de sua produção e essa indústria esteja experimentando um crescimento explosivo, haverá maior necessidade de reciclar os módulos que foram desativados. Assim, é essencial que haja políticas instituidoras de reciclagem para minimizar os danos no futuro (McDonald, 2010).

Em razão desse elevado crescimento na última década, Choi et al. (2013), apresentou maneiras sustentáveis e eficientes de reciclagem de painéis fotovoltaicos. De acordo com Choi (2013), o primeiro passo dentro desse processo é coletar os painéis desativados e então transportá-los até um local para começar a reciclagem. A figura 3 ilustra o esquema de coleta de PSF até a destinação final.

FIGURA 3 - FLUXOGRAMA DE RECICLAGEM DE PSF.



Fonte: Adaptado de Choi (2013).

O módulo é inicialmente separado de forma manual, e então um processo térmico queima a resina EVA que é usada como um produto resistente à umidade. Já o vidro temperado foi recuperado usando solvente, e o silício através de tratamento químico pela remoção de impurezas metálicas na superfície das células fotovoltaicas (Kang, 2012).

Para recuperação do vidro temperado, foi colocado o módulo fotovoltaico em uma solução contendo solvente orgânico afim de derreter a resina de EVA. Assim, foi possível separar o vidro da célula fotovoltaica, e então, esta última foi imersa em uma solução química contendo uma solução surfactante, onde foi possível remover metais impuros e deixar o silício o mais puro possível para reutilização.

A caixa de junção vai para uma empresa de aproveitamento de sucata e o plástico é queimado após o tratamento térmico. Os resíduos vão para um aterro, já o alumínio, vidro, cobre e silício podem ser vendidos para empresas de reciclagem (Choi, 2013).

Através deste levantamento das fases do ciclo de vida de um PSF, torna-se visível e possível realizar a ACV para este tipo de produto, simulando o potencial de impacto ambiental dele em relação as fases do ciclo de vida.

4. METODOLOGIA

4.1 Classificação de Pesquisa

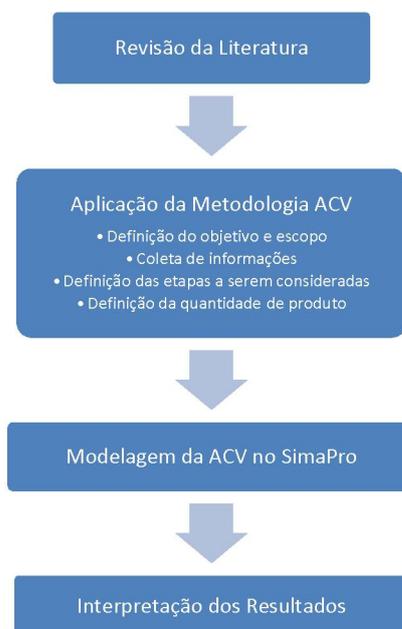
Esse projeto de pesquisa tem como natureza uma abordagem aplicada, dedicada à geração de conhecimento para solução de problemas ambientais relacionados ao painel solar fotovoltaico; de método quantitativo, pois reúne e compara respostas pré-determinadas; de caráter exploratório, com levantamento de dados e referências bibliográficas; e teve como base o estudo de caso, enfatizando um fenômeno específico e buscando retratá-lo de maneira mais complexa e profunda.

4.2 Etapas de Pesquisa

Primeiramente, foi realizado uma revisão de literatura de modo a se obter uma fundação teórica acerca do tema. Em seguida, foi aplicada a metodologia ACV e seguindo suas etapas, através da definição do objetivo e escopo, a coleta das informações necessárias, definição das etapas a serem consideradas e a definição de inventário e método de avaliação dos impactos e suas categorias. Com isso, foi definido a quantidade de produto de entrada e saída a serem analisados.

Por fim, foi feita a modelagem da ACV no software SimaPro, utilizando para a simulação do processo a base de dados do inventário Ecoinvent e então, por meio do método de avaliação de impacto o Impact 2002+. A figura 4 faz a representação esquemática das etapas da pesquisa.

FIGURA 4 - ETAPAS DO ESTUDO.



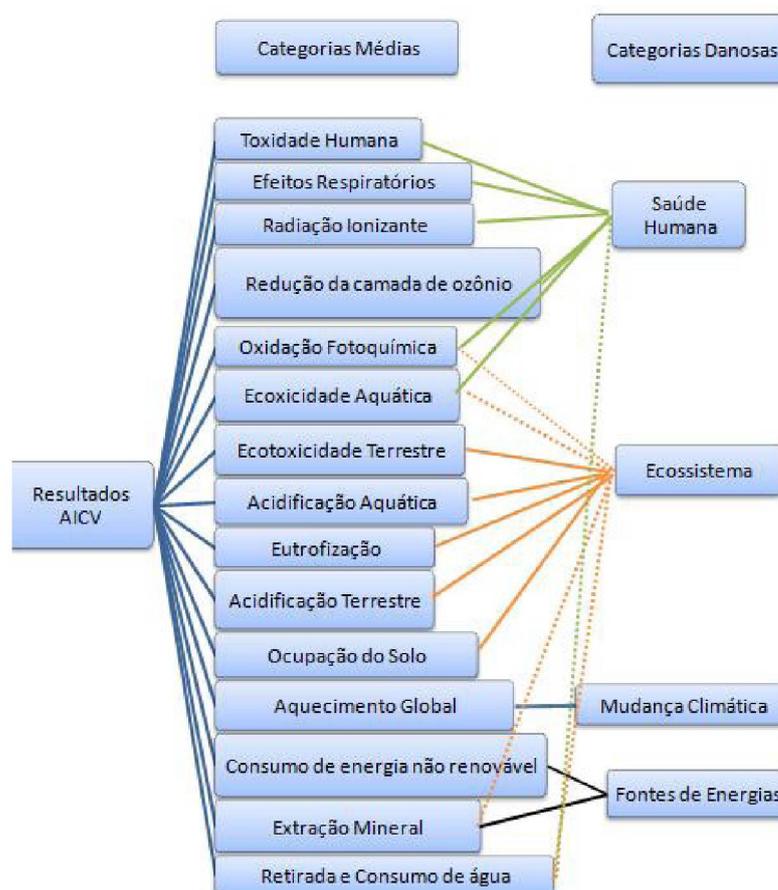
Fonte: A Autora (2019).

A realização de uma avaliação do ciclo de vida gera uma quantidade de dados relevante. Como forma de facilitar o levantamento, organização e análise desses dados existem softwares, base de dados e métodos de avaliação de impacto disponíveis.

Para o estudo em questão, o software utilizado foi o SimaPro, versão 9.0.0, da empresa holandesa Pré-Consultants, especializada em abordagens ACV, o que facilitou a gestão operacional do estudo, mantendo-o em conformidade com as recomendações das normas ISO vigentes. De acordo com a Pré-Consultants, o software SimaPro é líder na área de ACV e é utilizado por indústrias, consultorias, universidades e institutos de pesquisas em mais de 80 países. Ele possui as mais importantes bases de dados de inventário de ciclo de vida (ICV) e métodos de análise de impacto (AICV) desenvolvidos no Planeta.

O método de avaliação de impacto escolhido foi o IMPACT 2002+, que propõe uma implementação viável ligando todos os tipos de resultados através de categorias intermediárias. Como é possível observar na figura 4.

FIGURA 5 - ESQUEMA IMPACT 2002+.



Fonte: Adaptado de Jolliet et al. (2003).

Como mostrado na figura acima, os resultados da AICV resultam à impactos de nível médio, também chamados de categorias médias, e desse, caracteriza-se os fluxos elementares que causam o impacto ambiental, chamado de categoria de dano. Jolliet et al. (2003).

Dentre todos os métodos de AICV, O IMPACT 2002+ é um dos mais relevantes para indicar a importância do impacto ambiental nos processos, por ser um dos mais conhecidos e utilizados no mundo. Carvalho et al. (2013).

5. RESULTADOS

5.1 Definição de Objetivo e Escopo

O módulo funcional para esse trabalho foi o painel solar fotovoltaico de silício. Esse estudo levou em conta a abordagem similar a "berço ao túmulo", que leva em consideração o processamento de materiais utilizados da manufatura, até a correta destinação.

Esse projeto teve como principal objetivo se analisar e avaliar os impactos ambientais gerados pelo painel solar fotovoltaico através da metodologia ACV.

Dentro da definição do escopo, é de grande importância a definição da função, unidade funcional e fluxos de referência. A função deve estar de acordo com o objetivo da ACV, a unidade funcional garante a comparabilidade dos resultados de ACV e os fluxos de referência devem satisfazer a função determinada. Na tabela 2 são apresentados esses dados.

TABELA 1 - DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO, UNIDADE FUNCIONAL E FLUXO DE REFERÊNCIA DA ACV.

Função	Gerar energia para uso domiciliar
Unidade Funcional	Gerar 115 MkW
Fluxo de Referência	1 unidade (1 PSF)

Fonte: A Autora (2019).

5.2 Análise de Inventário De Ciclo De Vida

Para realizar o inventário do ciclo de vida do PSF foi utilizada a biblioteca do Impact 2002+, sendo um dos métodos de AICV mais relevantes e utilizados no mundo.

Neste estudo, foi considerado a ACV do PSF desde a extração da matéria prima, a etapa de uso e o descarte final. A última fase, ou seja, de destinação, foi dividida em duas: aterro e reciclagem. Todas as informações relativas às quantidades de entrada e saídas utilizadas na realização do inventário do processo foram obtidas a partir de revisões literárias, que foram utilizadas para alinhar junto com a base de dados do Impact 2002+ para análise. Na tabela 2 é possível

visualizar a quantidade de cada componente utilizado para a realização de um PSF e a porcentagem do mesmo em que pode ser reciclado. Esses dados foram utilizados no software para comparação dos resultados.

TABELA 2 - COMPONENTES E RESPECTIVAS QUANTIDADES UTILIZADAS EM UM PSF.

Componente	Quantidade	Unidade	Porcentagem (%)
Vidro	700	Kg	70
Caixa de junção	180	Kg	18
EVA- Encapsulante	51	Kg	5,1
Silício	36,5	Kg	3,65
Caixa de junção	15	Kg	1,5
Cabos	10	Kg	1
Condutor interno- Alumínio	5,3	Kg	0,53
Condutor interno- Cobre	1,14	Kg	0,11
Prata	0,53	Kg	0,053
Outros metais	0,53	Kg	0,053
Total	1000	Kg	100

Fonte: Adaptado de Latunussa (2016).

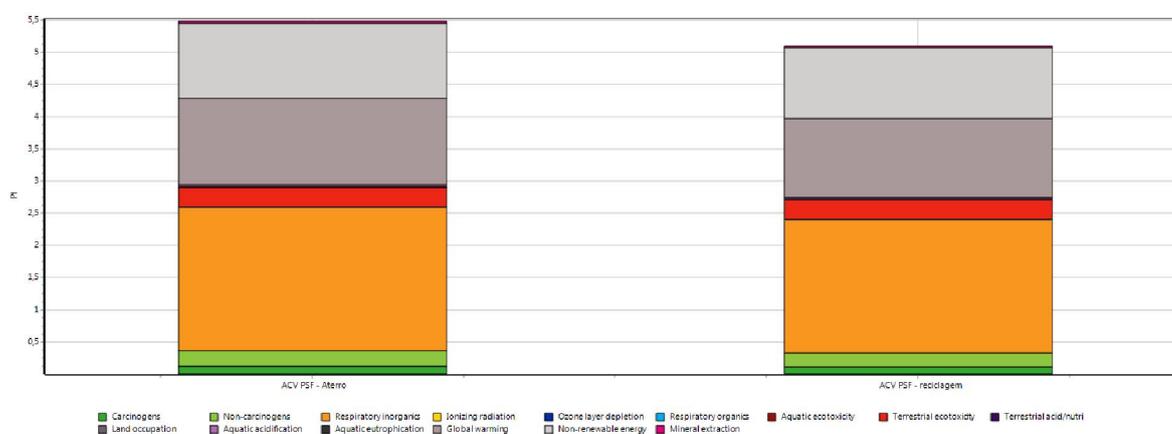
5.3 Avaliação de Impacto De Ciclo De Vida

O método Impact 2002+ possui treze categorias de acordo com o impacto causado, sendo esses: toxicidade humana (cancerígenos e não cancerígenos), efeitos respiratórios de compostos inorgânicos, radiação ionizada, depreciação da camada de ozônio, oxidação fotoquímica, eco toxicidade aquática, eco toxicidade terrestre, nitrificação, acidificação aquática, eutrofização, aquecimento global, energia não renovável e extração mineral.

O SimaPro foi utilizado para representação dos gráficos, onde foi comparado o impacto causado pelo ciclo de vida de um PSF com dois possíveis cenários, o descarte ao aterro e à reciclagem.

Na figura 6, tem-se um comparativo da ACV do PSF por dois processos diferentes de descarte, o aterro e a reciclagem. Como esperado, observa-se que o descarte direto ao aterro causa um impacto de aproximadamente 7% maior que o processo de reciclagem. Isso porque materiais como o vidro, metais condutores e outros, poderiam ser reutilizados e voltariam à fabricação de células e novos módulos fotovoltaicos. Estes resultados incluem o processo de reciclagem envolvendo desmantelamento e tratamento térmico e químico.

FIGURA 6 - COMPARATIVO DOS PROCESSOS DE DESCARTE DE UM PSF PELO MÉTODO IMPACT 2002+.

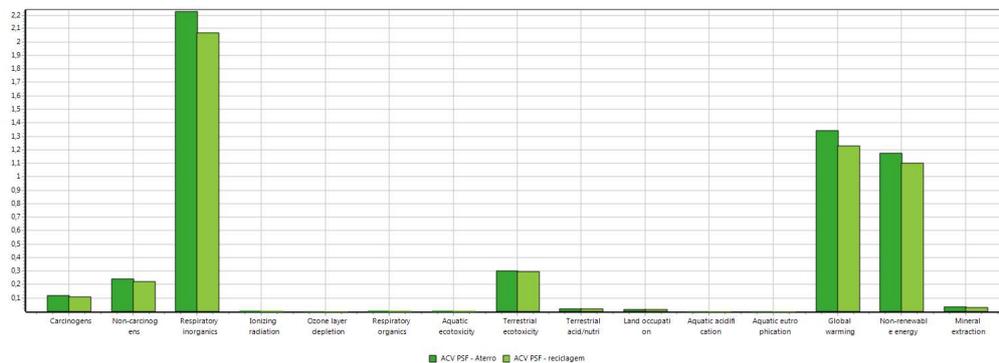


Fonte: A Autora (2019).

Já na figura 7, foi feito o mesmo cenário de ACV porém com o gráfico normalizado, o que significa que todas as categorias de impacto estão na mesma unidade de medida e podem ser comparadas entre si.

Verificou-se então, que das categorias que mais apresentam impacto para o ciclo de vida de um PSF estão os efeitos respiratórios de compostos inorgânicos, o aquecimento global e a utilização de energia não renovável. Esses resultados são principalmente da fase de manufatura, onde há o consumo de energia para a fabricação dos componentes.

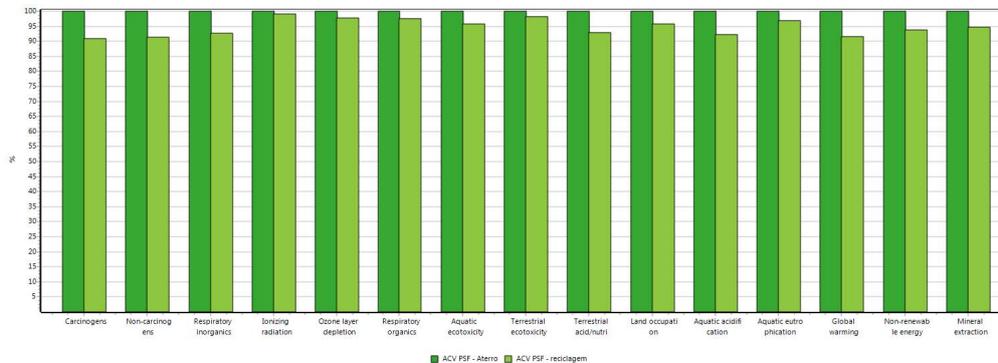
FIGURA 7 - COMPARATIVO NORMALIZADO DOS PROCESSOS DE DESCARTE DE UM PSF PELO MÉTODO IMPACT 2002+.



Fonte: A Autora (2019).

Por último, na figura 8 o gráfico está caracterizado, ou seja, está numa escala de 0-100% onde o resultado está individualizado para cada indicador.

FIGURA 8 - COMPARATIVO CARACTERIZADO DOS PROCESSOS DE DESCARTE DE UM PSF PELO MÉTODO IMPACT 2002+.



Fonte: A Autora (2019).

De acordo com os resultados demonstrados neste estudo, verificou-se que o processo de reciclagem pode diminuir os impactos do Potencial de Aquecimento Global em até 8%, uma vez que os resíduos não vão diretamente ao aterro. Os efeitos respiratórios de compostos inorgânicos são 7% menores devido ao

reaproveitamento dos materiais, ocasionando uma busca menor por matéria-prima. Já a utilização de energia não renovável é 6% menor, pois seria necessário menos energia no processo de manufatura.

6. DISCUSSÃO

Atualmente, os processos de reciclagem dos módulos fotovoltaicos não são tão praticados, mas a longo prazo pode assegurar a sustentabilidade da cadeia de fornecimento e aumentar a recuperação de energia e materiais incorporados, reduzindo as emissões de CO₂.

Já nos aspectos econômicos, a recuperação de materiais valiosos pode ter um grande valor, e se feita de maneira eficiente pode torná-los disponíveis para o mercado novamente.

De acordo com Weckend (2016), até 2030, o valor total do material recuperado da reciclagem de PSF é de 450 milhões de dólares. Com este montante, é possível produzir 60 milhões de módulos fotovoltaicos, o que representaria aproximadamente 33% da produção de 2015. Considerando o silício, até 30.000 toneladas podem teoricamente ser recuperados em 2030, que é a quantidade de silício necessário para produzir aproximadamente 45 milhões de novos módulos.

Nesse cenário, existe a possibilidade de que os materiais das células fotovoltaicas desativadas possam ser recuperados e reutilizados, visto que muitos dos materiais semicondutores podem ser reutilizados, o que diminuiria também o impacto ambiental na manufatura, uma vez que serão retirados menos matéria-prima. Outra forma de incentivo à reciclagem é através do auxílio do governo que pode assumir sua responsabilidade ambiental e regulamentar a indústria de PSF para garantir a reciclagem e evitar que materiais perigosos entrem em aterros locais. Isso criará uma vantagem competitiva para empresas que trabalham duro para evitar materiais tóxicos ou que já instituíram programas de reciclagem. Assim, as empresas ambientalmente mais responsáveis são recompensadas por seus investimentos.

7. CONCLUSÃO

A avaliação do ciclo de vida de painéis fotovoltaicos tem sido muito estudada, porém a fase após o uso dessas células estão sendo excluídas e esquecidas das análises, basicamente pela baixa quantidade de painéis dispostos e pela falta de dados e estudos. Todavia, é esperado que haja um aumento significativo desses painéis no meio ambiente nas próximas décadas, sendo necessário uma reutilização ou reciclagem desses materiais.

Para isso, a avaliação do ciclo de vida tem sido aplicada para se analisar os impactos ambientais durante todo o processo. Como visto, o maior impacto no ciclo de vida dos PSF é durante a fase de manufatura, onde há o consumo de energia para a fabricação dos componentes.

Além disso, foi constatado que no cenário em que ocorre a reciclagem das partes metálicas e do vidro do PSF há uma melhoria de desempenho ambiental. Isso é um demonstrativo de que com o elevado crescimento do mercado de PSF é importante que haja investimentos e estudos para um sistema de tratamento e recuperação deste resíduo, a partir do momento em que forem descartados.

8. REFERÊNCIAS

A USER GUIDE FOR THE LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT METHODOLOGY IMPACT 2002+. Jolliet, 2003.

ADISSI, J.P., et. al. **Gestão Ambiental de Unidades Produtivas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas da Energia Elétrica do Brasil**. Brasília – DF, 2016. 2ª Edição.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA (ABINEE). **Proposta Para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**. Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009, 21p.

CARVALHO, A., 2013 **From a Literature Review to a Framework for Environmental Process Impact Assessment Index**.

DIAS, G. F. **Pegada Ecológica e Sustentabilidade Humana**. 1 ed. São Paulo:Gaia, 2007.

CHOI, J., FTHENAKIS, V., 2013 **Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives**.

KANG, S.; YOO, S.; LEE, J.; BOO, B.; RYU, H., 2012. **Experimental Investigations for Recycling of Silicon and Glass from Waste Photovoltaic Modules**.

Latunussa, C.E.L., Ardente, F., Blengini, G.A., Mancini, L., 2016. **Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels**.

Ministério Do Meio Ambiente (MME). **Responsabilidade Socioambiental. Produção e consumo sustentáveis. Consumo consciente da embalagem. Impacto das embalagens no meio ambiente**.

MCDONALD, N. C.; PEARCE J. M., 2010. **Producer Responsibility and Recycling Solar Photovoltaic Modules**.

MOTTA, R.S. **Economia Ambiental**. 1. ed. Rio de Janeiro: FGV, 2006, 228p.

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

OLIVEIRA, H. E. **Tecnologia Fotovoltaica em Filmes Finos (Películas Delgadas)**. Minas Gerais, 2008.

RAMOS, C.; RUIZ, E.T.N.F.; BICALHO, F.W.; BARBOSA, J.M.; BARROS, L.V.; RABASSA, M.M.M. **Cadeia de Valor da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**. Brasília: SEBRAE, 2018.

SILVA, R. M. **Energia Solar: dos incentivos aos desafios**. Texto para discussão nº 166. Brasília. Senado Federal, 2015.

Weckend S, Wade A, Heath G. **End-of-Life Management Solar Photovoltaic Panels**. IRENA and IEA-PVPS; 2016