# VALORAÇÃO ECONÔMICA DE IMPACTOS AMBIENTAIS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: UM ESTUDO DE CASO

**Rafael Coelho Junqueira** – rafaeljunqueira@ufmg.br
**Wadaed Uturbey** – wadaed@cpdee.ufmg.br
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais

***Resumo.*** *Neste trabalho é realizada a valoração econômica dos impactos ambientais da cadeia de produção de um sistema solar fotovoltaico de 570 kWp, através de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e o método econômico de restrição orçamentária. A energia fotovoltaica possui impactos leves em sua fase de instalação e operação, sendo a produção de seus componentes o estágio mais problemático. Através da ACV, foi considerada a cadeia de produção deste sistema, desde a extração do silício, passando por sua purificação, preparo dos componentes e instalação do sistema. As etapas de transporte também foram consideradas. Através do método de avaliação de impactos ambientais utilizado, o IMPACT2002+, os resultados são divididos em três áreas de proteção: saúde humana, ecossistema e recursos. O método de restrição orçamentária foi então utilizado para obtenção do valor econômico dos impactos. O sistema estudado, uma planta de 570 kWp, apresentou um valor de externalidades ambientais mais elevado que outras fontes de energia renovável, porém muito menor que fontes que utilizam combustíveis fósseis, e quatro vezes menor que o valor obtido para a matriz elétrica brasileira. Limitações são inerentes à análise, como o fato das bases de dados de inventário disponíveis não refletirem os processos mais atuais da indústria, o que pode levar a resultados de custos ambientais maiores do que são de fato.*

***Palavras-chave:*** *Valoração Econômica de Impactos, Análise de Ciclo de Vida, Energia Solar Fotovoltaica*

## 1. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica está sempre atrelada a impactos ambientais e as diferentes tecnologias de geração afetam ao meio ambiente de forma diversa. A geração solar fotovoltaica é em geral considerada uma fonte limpa. Esta afirmação é adequada quando se considera apenas a etapa de operação das usinas já construídas, dado que não existem emissões de gases poluentes. Entretanto, ao observar o ciclo de vida completo da tecnologia, observa-se que a etapa de produção das células fotovoltaicas envolve o manuseio de diversas substâncias poluidoras (Alsema *et al.*, 2006; Tsoutos *et al.*, 2005).

Os diversos impactos ambientais podem agregar valor às atividades humanas ou, ao contrário, afetar negativamente. Nesse último caso, representam custos adicionais pois deverão ser realizadas ações para mitigar os impactos negativos. Em geral, esses custos não são levados em consideração nas avaliações de custo-benefício da tecnologia, na comparação com outras fontes de geração nem na formação de preço da energia elétrica. Os custos que se utilizam nessas avaliações são apenas os de construção e operação das usinas. Dessa forma, os impactos ambientais constituem externalidades. Em economia, o conceito de externalidade refere-se ao fato das atividades de um agente econômico refletir positiva ou negativamente em outro agente econômico que não participa dessas atividades. Assim, conceituando os impactos ambientais da geração de energia como externalidades ambientais, abre-se um caminho para aplicação de conceitos, técnicas e desenvolvimentos provenientes da área econômica que visam corrigir esta falha. Nesse sentido, este trabalho aborda a valoração monetária de impactos ambientais associados à geração fotovoltaica, visando obter um valor para os custos ambientais que possa ser utilizado nos mecanismos de mitigação de impactos.

Devido ao fato dos impactos da geração fotovoltaica estarem associados principalmente à etapa de produção das células fotovoltaicas e, em muito menor grau, à implantação da usina, propõe-se utilizar uma metodologia que considere o ciclo de vida da tecnologia. Assim, o método de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é utilizado como ferramenta para a valoração monetária dos impactos ambientais.

É importante ressaltar que, embora a valoração monetária é uma ferramenta bastante utilizada na análise custo benefício, poucos métodos de ACV implementam essa etapa (Pizzol e Weidema, 2014).

O artigo está organizado em cinco seções. A seção 2 descreve a metodologia ACV de forma geral. As especificidades da sua utilização para valoração monetária são apresentadas na seção 3. Na seção 4, ilustra-se a aplicação da metodologia com um estudo de caso. Finalmente, a seção 5 conclui o trabalho.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Avaliação de Ciclo de Vida

A ACV é uma ferramenta poderosa desenvolvida para a avaliação ambiental completa de determinado produto. A análise pode ser realizada ao longo do ciclo de vida do produto, partindo-se da etapa de coleta de matérias-primas até o

descarte dos materiais no fim de sua vida útil, incluindo todo o consumo de energia no ciclo de vida. De maneira mais específica, segundo (EPA, 2006), ACV é uma técnica para avaliar os aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto, processo ou serviço, que permite compilar um inventário de insumos energéticos e materiais relevantes e liberações ambientais; avaliar os potenciais impactos ambientais associados às entradas e saídas identificadas; interpretar os resultados para informar aos tomadores de decisão.

A norma (ABNT, 2009) define as quatro fases necessárias da metodologia ACV. A primeira fase compreende a definição de Objetivo e Escopo do estudo. A segunda fase é o Inventário do sistema em análise, que envolve um extenso banco de dados de materiais associados ao produto ou sistema em questão, incluindo o levantamento, a coleta e a análise dos dados necessários para a ACV. O inventário deve conter dados sobre todas as entradas e saídas de cada processo individual do sistema examinado, como fluxos de energia, poluentes, materiais e recursos. Os dados levantados, ou seja, entradas e saídas, são todos quantificados, de forma que possam ser utilizados posteriormente para análise e obtenção dos impactos ambientais na fase seguinte da ACV, a Avaliação de Impacto. Esta terceira fase refere-se à identificação e avaliação em termos de impactos potenciais ao meio ambiente que podem ser associados aos dados obtidos no inventário. Ela relaciona o inventário aos problemas ambientais deles decorrentes. Ao final da avaliação de impacto do ciclo de vida, tem-se como resultado final um perfil ambiental do produto em estudo, conforme definido no objetivo e escopo. Esses resultados serão interpretados na última fase da estrutura metodológica da avaliação do ciclo de vida. Esta quarta e última fase, Interpretação, tem como objetivo analisar os resultados, fazendo-se conclusões e recomendações a respeito da análise realizada. A interpretação deve ainda expor as limitações existentes que possam afetar os objetivos iniciais ou inviabilizar a análise (Pierkaski *et al.*, 2012). As fases da ACV estão ilustradas na Fig. 1.

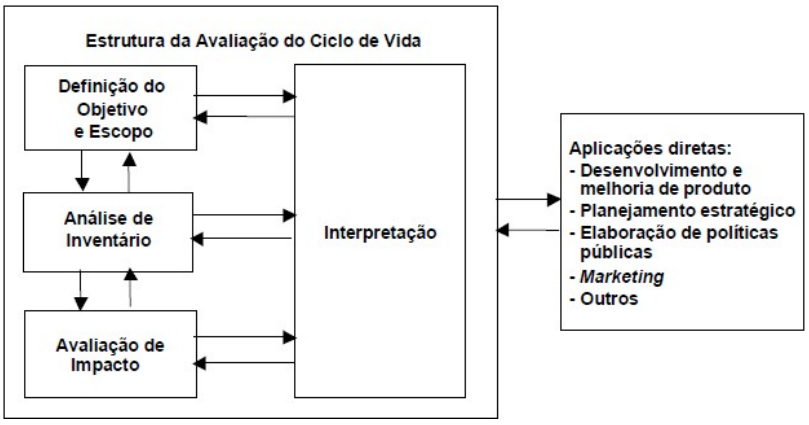


Figura 1 – Fases da metodologia LCA. (ABNT, 2009).

## 2.2 Valoração econômica

Valoração econômica está estritamente relacionada ao conceito de externalidades em economia de bem estar (Alves, 2009). Externalidades são exemplos típicos de falhas de mercado (Pizzol *et al.*, 2014). No setor elétrico, a falha de mercado pode ser identificada no processo de formação de preços no mercado de energia elétrica. Há um elevado nível de emissões de poluentes causados pela atividade de geração de energia elétrica que ocasionam significativos impactos às mudanças climáticas, à saúde humana e outros. Esses impactos ambientais não são alocados pelas transações do mercado, que ocasionam o surgimento de externalidades negativas para a sociedade. Ou seja, o sistema de formação de preços no setor elétrico não modela os impactos ambientais relativos ao processo de geração de energia elétrica. Há, assim, uma alocação inadequada dos recursos no setor. Tem-se ainda que, no modelo econômico do setor elétrico, as fontes alternativas e limpas, cujos preços não representam seus benefícios ambientais, permanecem menos competitivas para atuarem no mercado. Por outro lado, as fontes convencionais, cujos impactos negativos ao meio ambiente não são manifestados nos preços da energia, permanecem mais competitivas e atuantes. (Alves, 2009).

Para corrigir falhas de mercado, e atingir a alocação ótima de recursos, externalidades precisam ser internalizadas, isto é, contabilizadas no sistema econômico, e então refletidas nos preços de bens e serviços. Uma questão chave na quantificação das externalidades é a valoração monetária (Pizzol *et al.*, 2014).

Questões éticas surgem quando se fala da valoração econômica do meio ambiente. Obviamente há valores que não são negociáveis e aos quais não se consegue atribuir um preço, como à vida humana, a espécies animais, a uma floresta e vários outros exemplos similares. Entretanto, o escopo da valoração monetária é limitado à determinação do valor de uma mudança marginal na disponibilidade destes bens. Estas mudanças na disponibilidade contemplam mudanças na qualidade e quantidade de um bem ou serviço que é disponibilizado para a sociedade. O que é medido é a disposição a pagar (DAP) para evitar-se uma mudança ou para compensação da conseqüente mudança. Por exemplo, valoração econômica não busca conceber uma medida de um valor absoluto para uma vida humana, mas, ao contrário, o valor que indivíduos estão dispostos a pagar por pequenas mudanças na expectativa ou qualidade de vida (Pizzol *et al.*, 2014).

### 2.3 Valoração Econômica de Impactos Ambientais através de Análise de Ciclo de Vida

A valoração econômica através de ACV é uma maneira de se realizar a chamada ponderação dos resultados da ACV. A ponderação é uma fase opcional na ACV, útil quando se deseja atribui maior ou menor peso a determinados impactos, sendo os resultados quantificados em valores de fácil interpretação, como pontuação, índices de qualidade de vida e de meio ambiente, valores monetários ou outras formas. Assim, os resultados dos impactos tornam-se comparáveis entre si e mais claros aos tomadores de decisão. A valoração econômica pondera os resultados da ACV por valores monetários. Um dos desafios para a aplicação da valoração econômica em ACV é que os impactos têm um elevado nível de abstração. Ou seja, os impactos não se referem a situações em específico, sendo generalizáveis (Pizzol *et al.*, 2014). Ou seja, o que a ACV contabiliza são os potenciais de impacto, e não o impacto exatamente conforme ocorrerá em um empreendimento, o que é imprevisível.

O trabalho de Pizzol *et al.* (2014) defende que a valoração econômica tem grande potencial para ser aplicada em ACV. Traz também uma revisão de diferentes métodos de valoração aplicáveis em ACV, que são avaliados por uma série de critérios, que vão desde embasamento científico à incerteza e complexidade. Dentre uma série de métodos estudados, o método de restrição orçamentária aparece em destaque. Este está baseado no fato de que o maior valor que poderia ser pago por uma pessoa, na média, para mitigação de impactos é a sua renda. Assim, a disposição a pagar é inferida pelo rendimento de uma pessoa, que é determinado como sendo a produção econômica *per capita*. Como vantagem, é citado que o método é capaz de reduzir incertezas existentes no uso de outros métodos de valoração econômica. São sugeridos mais estudos e aplicações do método para verificar sua potencialidade e incertezas.

Desta forma, a presente publicação considera o uso do método de restrição orçamentária para determinação dos valores econômicos de impactos ambientais. A seção 3.2 deste artigo traz suas características principais.

### 2.4 A cadeia de geração de energia solar fotovoltaica

Este trabalho considera o inventário de ciclo de vida (segunda fase da ACV) proposto por Jungbluth *et al.*, (2010), que constitui a cadeia de produção de energia fotovoltaica presente na base de dados do Ecoinvent versão 3.1 (www.ecoinvent.org). O Ecoinvent é uma associação internacional que provê dados bem documentados de processos de produção de milhares de produtos de diferentes áreas (energia, agricultura, transporte, construção, etc), visando fornecer inventários para ACV.

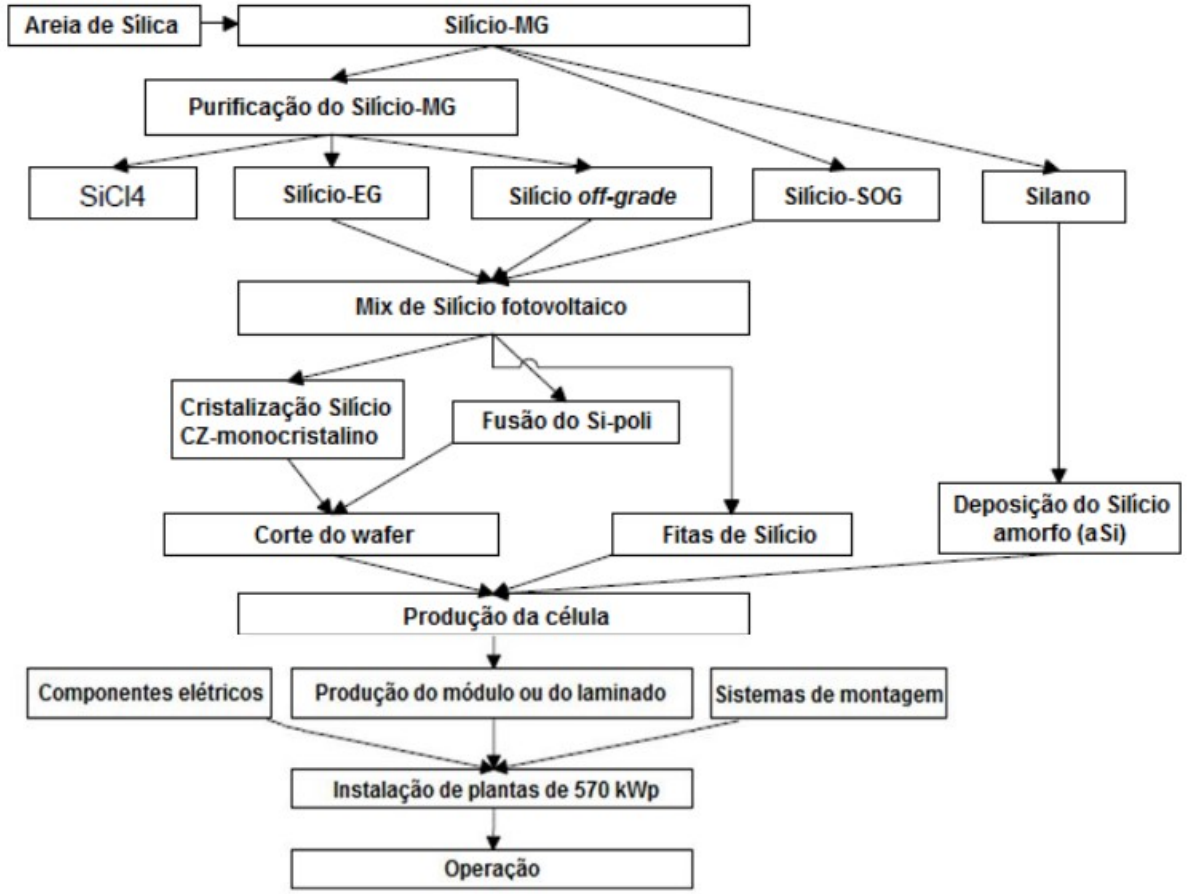


Figura 2 – Processos envolvidos na obtenção de energia solar fotovoltaica. Silício-MG: Silício em grau metalúrgico. Silício-EG: Silício em grau eletrônico. Silício-SOG: Silício em grau solar. CZ-monocristalino: silício monocristalino obtido por processo Czochralski. Si-poli: Silício policristalino (ou multicristalino). aSi: Silício amorfo. Fonte: Adaptado de Jungbluth *et al.* (2010)

O inventário de Jungbluth *et al.*, (2010) foi coletado diretamente dos fabricantes e também de outros projetos de pesquisa, sendo um inventário composto então por informações de vários autores, visando criar uma base de dados representativa do estado da arte de todos processos envolvidos na produção de energia solar fotovoltaica. O inventário abrange as células mono e policristalinas, fita de silício, silício amorfo, CdTe e células de filme fino CIS, sendo que neste artigo está sendo considerada somente a tecnologia de silício policristalino. A Fig. 2 traz um esquema simplificado dos processos de produção de energia solar fotovoltaica considerados neste estudo, desde a extração do silício e transformação em silício metalúrgico, passando pela purificação do mesmo até atingir grau solar e ser disposto em células fotovoltaicas nos módulos. Também estão incluídos componentes auxiliares, o chamado *Balance of System* (BoS). O inventário em questão vai desde a extração do silício até a montagem da planta, incluindo o uso de energia necessário durante a fase de montagem. Não inclui a fase de operação da planta, nem o descarte ou reciclagem dos componentes no fim da vida útil. Maiores detalhes do processo podem ser encontrados em Jungbluth *et al.*, (2010).

## 3. ESPECIFICAÇÕES DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO E DO MÉTODO DE VALORAÇÃO ECONÔMICA

### 3.1 O método de Avaliação de Impacto

A etapa de Avaliação de Impacto é a fase responsável por gerar os resultados da ACV. É nela que as emissões do sistema, que foram estipuladas na segunda etapa, de análise de inventário, são quantificadas em termos de seus potenciais impactos ambientais. Nesta fase do estudo, o impacto potencial de cada emissão do inventário para o meio ambiente é modelado quantitativamente de acordo com o chamado mecanismo ambiental, utilizando um modelo de caracterização. Este modelo calcula fatores de caracterização para as emissões, que são determinados com base técnico-científica, e expressam o potencial de impacto de cada emissão em termos de uma única unidade. Deste modo, os resultados são os indicadores de categoria, expressos em uma unidade comum a todas as contribuições dentro da categoria de impacto (por exemplo, diferentes gases que contribuem para a categoria de impacto mudanças climáticas são expressos em termos da unidade quilogramas equivalentes de $CO_2$) (Pierkaski *et al*, 2012).

De maneira resumida, os métodos de Avaliação de Impacto tem o seguinte mecanismo: uma emissão (massa de certa substância) é relacionada a uma mudança temporária na concentração desta substância em um meio natural (água, terra ou ar). Em seguida esta concentração temporária é relacionada a um efeito naquele meio, como por exemplo um aumento na acidificação do solo ou um aumento na temperatura ambiente (função dose-resposta). A seguir estes efeitos são relacionados à consequência à vida humana, ao ecossistema ou ao uso de recursos. A Fig. 3 ilustra este processo.

O Guia Metodológico de Análise de Ciclo de Vida de Eletricidade Fotovoltaica, da Agência Internacional de Energia (Fthenakis, 2011) recomenda as categorias de impacto que devem estar presentes numa ACV. São elas: emissões de gases de efeito estufa, demanda cumulativa de energia, potencial de acidificação, potencial de depleção da camada de ozônio, toxicidade humana, ecotoxicidade e radiação ionizante. Todas estas categorias de impacto foram consideradas neste estudo, que utilizou o Impact 2002+ (Julliet *et al.*, 2003) como método de avaliação de impactos ambientais. Este é um método baseado no EcoIndicator99 (Goedkoop e Spriensma, 1999), porém revisado e mais atual.

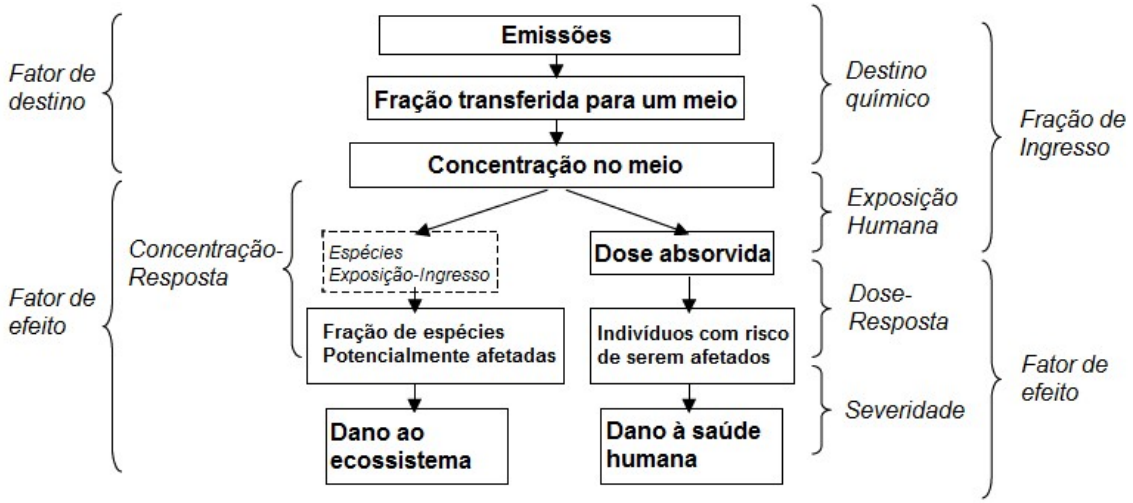


Figura 3 – Esquema geral do caminho percorrido por uma emissão até o impacto. Jolliet *et al.* (2003)

O Impact 2002+ apresenta os resultados de sua análise em duas etapas: *midpoints* e *endpoints. Midpoints* são resultados intermediários, tomados "no meio do caminho". Ou seja, são resultados parciais dos impactos, pois nesta etapa não são considerados ainda os danos aos receptores. Na etapa *endpoint* é que os receptores dos impactos são considerados. O método considera três áreas de proteção *endpoint*, sendo elas: vida humana, ecossistema e recursos.

Portanto, as categorias *midpoint* representam os efeitos físicos das emissões poluidoras, enquanto que as categorias *endpoint* vão além, e quantificam o dano que estes efeitos causam aos três receptores. A Fig. 4 ilustra o caminho desde as saídas do inventário, passando pelas categorias *midpoint*, que finalmente convergem para três categorias *endpoint*.

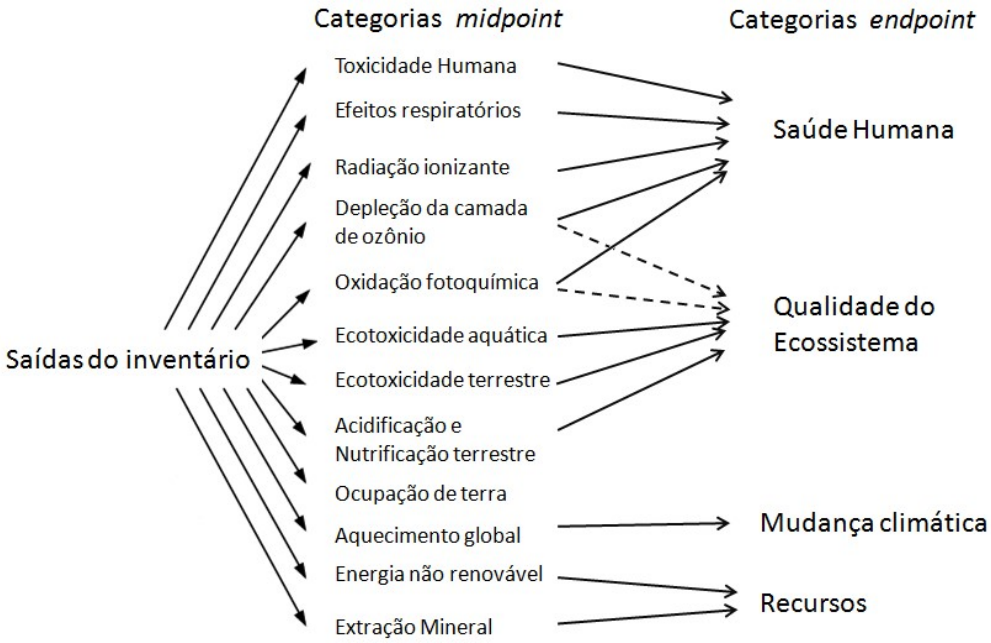


Figura 4 – Categorias *midpoint* e *endpoint* do método Impact 2002+. Adaptado de Jolliet *et al.* (2003)

### 3.2 O método de valoração econômica - Restrição orçamentária

A valoração econômica pode, em teoria, ser realizada tanto nos indicadores *midpoint* como *endpoint*. Este trabalho realiza a valoração nas categorias *endpoint*. Cada categoria *endpoint* – vida humana, ecossistema e recursos – possui uma diferente unidade, a fim de quantificar os danos que atingem estas áreas de proteção.

Dentro da categoria vida humana, o indicador considerado é o bem estar humano, medido através do QALY (*Quality Adjusted Life Year*, ou Anos de Vidas Ajustados por Qualidade). O QALY é um conceito surgido na década de 70 e vem sendo amplamente utilizado na literatura internacional. Ele atribui pesos a intervalos de vida vividos em diferentes estados de saúde. Um ano de saúde perfeita vale 1 (um), enquanto que um ano com saúde abaixo disto vale menos que um. Morte é considerada como equivalente a zero. É muito usado em decisões de alocação de recursos na área da saúde, por ser um índice que permite comparação entre alternativas. Possibilita assim que decisões sejam tomadas de maneira a priorizar aquelas que propiciem maior ganho de QALYs (Phillips, 2009).

Dentro da categoria de ecossistemas, o indicador usado é a biodiversidade, e a unidade de medida é o BAHY (*Biodiversity Adjusted Hectare Year*), que é a fração de espécies desaparecida em 1 hectare de superfície de terra em um ano.

Por fim, para a categoria recursos, é utilizado o indicador "produtividade de recursos", que é o valor econômico correspondente ao custo futuro daqueles recursos naturais que foram consumidos no processo.

Valendo-se dos indicadores *endpoint* dos métodos de avaliação de impacto, foi desenvolvida (Weidema, 2008) uma forma de valorar monetariamente os danos destas três áreas de proteção – vida humana, ecossistema e recursos.

A teoria econômica por trás da metodologia de valoração utilizada é a restrição orçamentária. Como o QALY é por definição um ano vivido em completo bem estar, a restrição orçamentária pode ser determinada como a potencial renda anual em completo bem estar, que é igual à potencial produção econômica anual *per capita* da melhor economia mundial (EUA). Este seria então o máximo valor que uma pessoa na média poderia pagar por 1 QALY. A potencial produção econômica anual per capita foi calculada, e seu valor é equivalente a 74,000 $EUR_{2003}$ por QALY (Weidema, 2008). A incerteza deste valor está na faixa de 62.000–84.000 $EUR_{2003}$. O valor é válido globalmente, e não apenas na Europa, apesar de expresso em $Euros_{2003}$ (valores em euros referentes ao ano de 2003).

O valor monetário atribuído a 1 BAHY foi determinado considerando-se que existe uma relação entre BAHY e QALY, no sentido de que o homem dá um valor ao meio ambiente que é uma fração do valor dado ao seu bem estar. Então, são consideradas "taxas de troca" entre BAHY e QALY. O valor médio destas taxas de troca é o gasto atual com proteção ambiental em países desenvolvidos. A estimativa é de aproximadamente 2% do PIB. O valor resultante é de 1400$EUR_{2003}$/BAHY, com incerteza variando entre €350 a €3500/BAHY (Weidema, 2008).

Dentro da categoria recursos, a valoração é realizada em termos de quantidade de energia (MJ). Têm-se dois indicadores *midpoint* que formam esta categoria: "extração mineral" e "uso de energia não-renovável". O indicador "extração mineral" baseia-se no fato de que no futuro a quantidade energética necessária para extração mineral será menor que a quantidade que é necessária no presente. Mesmo que a redução na disponibilidade destes minerais e

combustíveis implique num aumento na demanda de energia para sua extração, o estudo de (Chapman e Roberts, 1983) conclui que por muitas décadas, devido a melhorias na eficiência e nas tecnologias de extração, o consumo energético para extração seguirá a tendência atual, que é diminuir. Valores específicos para estes consumos são calculados conforme (Humbert *et al.*, 2012 e Goedkoop e Spriensma, 2001). Já o indicador "uso de energia não-renovável" mede a quantidade de energia primária não-renovável (MJ) consumida na extração dos combustíveis não renováveis. Para valoração econômica da categoria recursos, é assumido que, uma vez que as fontes de energia alternativas, à longo prazo, fornecerão a maior parte da energia, e que as mesmas estão se tornando cada vez mais competitivas, não há razão para assumir que os preços de energia no longo prazo irão exceder os preços correntes. Portanto, é utilizado um fator de caracterização de 0,004 $EUR_{2003}$ / MJ extra, baseado em preços correntes (Weidema *et al.*, 2008).

Maiores detalhes e considerações sobre o método são encontrados em Weidema (2008) e Weidema *et al.* (2008).

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Sistema Fotovoltaico em análise

Dentro da base de dados do Ecoinvent (versão 3.1), foi selecionado um modelo de uma planta fotovoltaica de 570 kWp da Espanha no ano de 2008. Os dados foram fornecidos pela operadora da planta, Edisun Power AG (Jungbluth *et al.*, 2010) e estão mostrados na Tab. 1, bem como as especificações do módulo fotovoltaico utilizado.

Tabela 1 – Especificações da planta fotovoltaica (Jungbluth *et al.*, 2010)

| | |
|---|---|
| Tecnologia | 2755 módulos de silício policristalino de 210Wp |
| Tensão de saída | Não especificada |
| Estrutura para montagem da planta | Instalações elétricas, suporte dos módulos e cercas |
| Inversor | 500 kW |
| Área de módulos instalados | 4273,50 m² |
| Proteção contra descargas atmosféricas | Não considerado |
| Comprimento do cabeamento | 5170 m |
| Comprimento do cabeamento dos módulos até o inversor | 1200 m |
| Caixas de junção | 200 kg |
| Tecnologia | Silício Policristalino (com frame) |
| Células por módulo | 60 células de 15,6 cm x 15,6 cm |
| Espessura do *wafer* da célula | 240 μm |
| Área do módulo | 1,6 m² |
| Eficiência da célula | 14,4% |
| Eficiência do módulo | 13,2% |

A unidade funcional considerada é o MWh. Assim, faz-se necessário determinar a geração de energia prevista pelo sistema. Para tanto, foram seguidas as recomendações contidas em Fthenakis *et al.* (2011), como Performance Ratio de 80%, perda de eficiência de 0,7%/ano e vida útil de 30 anos. Os dados são exibidos na Tab. 2.

Tabela 2 – dados utilizados para cálculo da geração da planta

| | |
|---|---|
| Potência nominal | 570 kWp |
| Performance Ratio | 80% |
| Vida útil da planta | 30 anos |
| Perda da eficiência por degradação dos módulos | 0,7%/ano |
| Irradiação solar global, média anual (valor ótimo na Espanha) | 2.008 kWh/m²/ano |
| Geração em 30 anos | **24.600 MWh (88.560 GJ)** |

O valor de irradiação solar global considerado (2008 kWh/m²/ano) é de pontos ótimos na Espanha (Ávila *et al.*, 2012), porém é mais comum em outros países, como por exemplo no Brasil.

É considerado ainda o transporte de componentes da planta. Para os módulos fotovoltaicos, é considerado o transporte de caminhões até o local de construção por uma distância de 500 km. Já para o transporte de outros componentes, é considerada uma distância de 100 km. É assumido que 20% dos módulos fotovoltaicos são produzidos em outros continentes, e então transportados para a Europa por navios. O tempo de vida dos inversores é de 15 anos.

### 4.2 Impactos Ambientais

Os resultados obtidos com o método de avaliação de impacto Impact 2002+ são dados em duas etapas: *midpoint* e *endpoint*. A Tab. 3 mostra os resultados da avaliação de impacto, discriminando as contribuições de cada categoria *midpoint* à área de proteção correspondente. Os valores são relativos à 1MWh de energia gerada.

Tabela 3 – Contribuições das categorias *midpoints* às respectivas áreas de proteção (*endpoints*). Valores por MWh.

| | | **Categorias *Endpoint* (áreas de proteção)** | | |
|---|---|---|---|---|
| **Categorias *Midpoint*** | | Qualidade do ecossistema | Saúde Humana | Recursos |
| Mudança Climática | 4,83E+01 kg $CO_2$ eq | 2,81E-03 BAHY | 1,02E-06 QALY | |
| Ecotoxicidade aquática | 2,29E-05 BAHY | 4,61E-03 BAHY | | |
| Ocupação de terra | 2,08E-03 BAHY | | | |
| Acidificação e nutrificação terrestre | 1,06E-04 BAHY | | | |
| Acidificação aquática | 2,82E-07 BAHY | | | |
| Eutrofização aquática | 1,51E-07 BAHY | | | |
| Ecotoxicidade terrestre | 2,40E-03 BAHY | | | |
| Toxicidade Humana | 5,56E-06 QALY | | 5,31E-05 QALY | |
| Radiação Ionizante | 1,57E-07 QALY | | | |
| Depleção da camada de ozônio | 9,99E-09 QALY | | | |
| Oxidação fotoquímica | 7,65E-08 QALY | | | |
| Efeitos respiratórios (inorgânicos) | 4,73E-05 QALY | | | |
| Extração mineral | 7,90E+00 MJ | | | 7,12E02 MJ |
| Energia não-renovável | 7,04E+02 MJ | | | |

## 4.3 Consumo energético

Especificamente para cálculo do consumo energético total do ciclo de vida deste sistema, foi utilizado o método *Cumulative Energy Demand* (Hischier *et al.*, 2010), visto que o Impact 2002+ não realiza este cálculo (apresenta somente o consumo de energia não-renovável). O valor obtido foi de **812MJ/MWh**. Ou seja, 812 MJ de energia (0,225 MWh) são consumidos para cada MWh de energia gerada pelo sistema em sua vida útil de 30 anos.

## 4.4 Valores obtidos para as externalidades do sistema fotovoltaico

Aplicando os valores propostos pelo método da restrição orçamentária para cada área de proteção, obteremos o valor total da externalidade produzida pela geração de 1 MWh pela usina em estudo. Na Tab. 4, os valores de externalidades são obtidos pelo produto da primeira coluna (resultado da ACV) pela segunda (euros/unidade *endpoint*).

Tabela 4 – Valores das externalidades, por MWh gerado

| | Resultado da ACV | $EUR_{2003}$/Unidade (Weidema, 2008) | Valor da externalidade ($EUR_{2003}$) |
|---|---|---|---|
| Qualidade do ecossistema | 7,42E-3 BAHY/MWh | 1.400 euros/BAHY | 10,39 €/MWh |
| Saúde Humana | 5,41E-5 QALY/MWh | 74.000 euros/QALY | 4,00 €/MWh |
| Recursos | 7,12E-2 MJ/MWh | 0,004 euros/MJ | 2,85 €/MWh |
| **Total** | | | **17,23 €/MWh** |

A Fig. 5 mostra a contribuição de cada categoria de impacto *midpoint* no custo das externalidades.

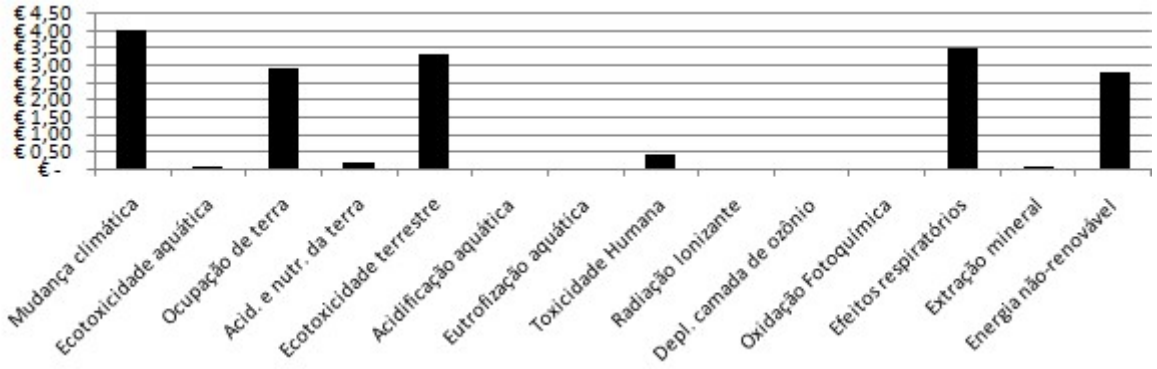


Figura 5 – Contribuição de cada categoria *midpoint* na composição do custo total

## 4.5 Valores obtidos para outras fontes de energia

A base de dados utilizada - Ecoinvent 3.1 - possui uma série de inventários da produção de energia por outras fontes. A fim de situar os custos externos obtidos para o caso de estudo, foram obtidos valores das externalidades oriundas de outras fontes de energia, utilizando também o método de restrição orçamentária descrito na seção 3.2. Não é

objetivo deste trabalho investigar os pormenores do inventário de ciclo de vida considerado ou fazer considerações sobre estes sistemas. Assim, os valores apresentados para outras fontes de energia representam uma primeira aproximação do que são os valores dos custos externos destes sistemas. A ACV realizada destes sistemas segue a mesma linha do estudo de caso: são consideradas emissões desde a extração das matérias primas até o fim da vida útil e são consideradas emissões provenientes dos sistemas de transporte utilizados na etapa de construção e operação. O método de avaliação de impactos ambientais também é o Impact 2002+. Os resultados estão mostrados na Fig. 6. Maiores informações sobre cada sistema estão disponíveis nas fontes citadas.

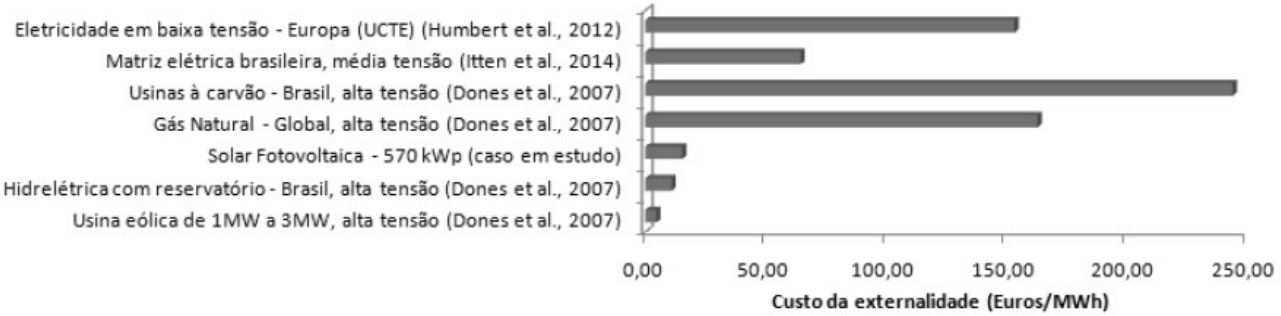


Figura 6 – Custos de externalidades de diversas fontes de geração de energia obtidas com a base de dados Ecoinvent 3.1

Os valores obtidos neste trabalho (em Euros) são referentes ao ano de 2003, conforme obtidos por Weidema (2008). Optou-se por não realizar nenhum câmbio entre moedas ou atualização para valores presentes, deixando a cargo do leitor do artigo, no momento oportuno, realizar estas conversões.

## 5. CONCLUSÕES

Foi realizada uma ACV completa de um sistema fotovoltaico de 570 kWp localizado na Espanha. Os dados do inventário são do estado da arte da cadeia de energia solar fotovoltaica em 2005, e o método de avaliação de impacto é destinado ao território europeu. Desta forma, não se pode assumir que tais resultados sejam válidos para qualquer local, por exemplo para o Brasil. Condições diversas, específicas de uma região, podem alterar os resultados dos impactos.

Não se dispõe publicamente de inventários da produção de módulos fotovoltaicos modernos. Os dados utilizados são de 2005, e certamente diversas melhorias nos processos de fabricação foram alcançadas. Pode-se destacar que a espessura do *wafer* das células aqui considerada (240 μm) e a eficiência de conversão das células (14,4%) são valores superados pelas as tecnologias atuais. O trabalho de Fu *et al.* (2014) apresenta um estudo de ciclo de vida de módulos de silício policristalino com espessura do *wafer* de 200 μm e eficiência de célula de 16%. Esta evolução na tecnologia tem efeito significativo para a diminuição do consumo de energia e nas emissões, e, consequentemente, nos impactos ambientais. Pode-se citar como referência também o relatório de Frischknecht *et al.* (2015), da Agência Nacional de Energia, que trata de ACV de sistemas fotovoltaicos futuros. Optou-se por não atualizar manualmente nenhum valor do inventário utilizado, uma vez que, por não se dispor de informações completas sobre tais processos de fabricação dos componentes, poderiam ser feitas alterações arbitrárias, perdendo-se assim a consistência da base de dados original.

Outros trabalhos realizaram a valoração dos impactos da energia solar fotovoltaica. Destacam-se dois projetos importantes realizados por países europeus: O NEEDS (*New Energy Externalities Development for Sustainability,* www.needs-project.org), que é baseado na metodologia desenvolvida pelo projeto ExternE (www.externe.info) e obteve um valor para as externalidades entre 6,80 e 12,50 €/MWh, para um sistema instalado em telhado, de potência não especificada, em condições médias de clima e irradiação europeias e módulos de silício monocristalino (NEEDS, 2009). Já o projeto CASES (*Cost Assessment for Sustainable Energy Systems*, www.feem-project.net/cases/project_plan.php.) obteve o valor de 8,88 €/MWh para uma usina em local aberto. É válido ressaltar que os resultados de cada trabalho variam principalmente com: as condições de cada sistema, os dados do inventário utilizado, aos impactos abordados e ao método de valoração econômica escolhido. Estes dois projetos não basearam-se em ACV para realizar a valoração.

Os resultados apresentados sinalizam que a energia solar fotovoltaica tem o potencial de ser bastante competitiva ambientalmente, com valores de externalidades ambientais comparáveis aos de usinas hidrelétricas com reservatórios e inferiores aos custos externos atuais da matriz elétrica brasileira. E, com o desenvolvimento atual e futuro nos métodos de produção dos componentes da cadeia solar fotovoltaica, especialmente no sentido de reduzir o consumo energético da purificação do silício, o potencial de redução dos custos externos é grande, o que coloca a energia solar fotovoltaica entre as fontes de geração de energia que apresentam os menores custos externos ambientais agregados.

Este trabalho mostrou, ainda, o potencial de aplicação da avaliação de ciclo de vida (ACV) e da valoração econômica de impactos ambientais como ferramentas úteis para os tomadores de decisão do planejamento do setor elétrico/energético. A ACV tem o potencial de avaliar os processos do ponto que se iniciam até o fim da vida útil daquele sistema, considerando desde extração de matérias primas, passando pelo transporte dos materiais, operação e indo até a disposição final dos componentes. Já o valor monetário dos custos externos é um índice capaz de agregar os mais diferentes impactos ambientais em um valor único, o que é de extrema utilidade, pois possibilita uma comparação clara e direta entre diferentes opções de geração de energia. Há ainda muito campo para melhorias neste tipo de análise, tanto na ACV quanto na valoração econômica. Mas o valor agregado destas ferramentas é grande, e devem ser mantidas em mente por parte dos tomadores de decisão do setor energético.

## REFERÊNCIAS

Alves, L. A., 2009. A valoração dos impactos ambientais associados à expansão da Matriz Elétrica Brasileira: proposta de instrumentos econômicos para a promoção das fontes alternativas e limpas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFMG, Brasil.

Ávila, J. M., Martín, J. R., Alonso, C. J., Escuin, M. C., Cadalso, J. M., Bartolomé, M. L., 2012. Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2009. NBR ISO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura.

Chapman, F., Roberts, F., 1983. Metal Resources and Energy. Butterworths. Monographs in Materials.

Cost Assessment of Sustainable Energy Systems (CASES), 2008. WP6 - DELIVERABLE D.6.1. Full cost estimates of the use of different energy sources.

Dones, R., Bauer, C., Bolliger, R., Burger, B., Heck, T., Röder, A., 2007. Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries.

E.A. Alsema, M.J. De Wild-Scholten, V.M. Fthenakis, 2006. Environmental Impacts of PV Electricity Generation - A Critical Comparison of Energy Supply Options. Presented At The 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference.

EPA, 2006. Life cycle assessment: principles and practice. U.S. Environmental Protection Agency.

Frischknecht, R., Itten, R., Wyss, F., 2015. Life Cycle Assessment of Future Photovoltaic Electricity Production from Residential-scale Systems Operated in Europe. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme.

Fthenakis, V., Frischknecht, R., Raugei, M., Kim, H. C., Alsema, E., Held., M., de Wild-Scholten, M., 2011. Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity, 2nd edition, IEA PVPS Task 12, International Energy Agency Photovoltaic Power systems Programme.

Goedkoop, M., Spriensma, R., 2001.The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report.

Hischier R., Weidema B., Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Frischknecht R., Hellweg S., Humbert S., Jungbluth N., Köllner T., Loerincik Y., Margni M. and Nemecek T., 2010. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. ecoinvent report No. 3, v2.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.

Humbert, S., De Schryver, A., Bengoa, X., Margni, M., Jolliet, O., 2012. IMPACT 2002+: User Guide.

Itten, R., Frischknecht, R., Stucki, M., 2014. Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid.

Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., Rosenbaum, R., 2003. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology.

Jungbluth, N., Stucki, M., Frischknecht, R., Büsser, S., 2010. Photovoltaics. Ecoinvent report No. 6-XII, ESU-services Ltd, Uster.

New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS), 2009. Deliverable n° 6.1 – RS1a. External costs from emerging electricity generation technologies.

Piekarski, C.M., Luz, L.M., Zocche, L., Francisco, A.C., 2012. Métodos de Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida: Uma discussão para adoção de métodos nas especificidades brasileiras. Revista Gestão Industrial. pp. 222-240.

Philips, C., 2009. What is a QALY? London: Hayward Medical Communications.

Pizzol, M., Weidema, B., 2014. Monetary valuation in Life Cycle Assessment: a review.

Tsoutsosa, T., Frantzeskakib, N., Gekasb, V., 2005. Environmental Impacts from the Solar Energy Technologies.

Weidema, B. P., 2008. Using the budget constraint to monetarise impact assessment results.

Weidema, B. P., Wesnaes, M., Hermansen, J., Kristensen, T., Halberg, N., 2008. Environmental Improvement Potentials of Meat and Dairy Products. JRC Scientific and Technical Reports.

## ECONOMIC VALUATION OF ENVIRONMENTAL IMPACTS OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY: A CASE STUDY

***Abstract.*** *This work presents the monetary valuation of the environmental impacts of the solar photovoltaic energy production chain of a 570 kWp power plant, through life cycle assessment (LCA) and the budget constraint economic method. The photovoltaic solar energy has low impacts during its installation and operation phases but the manufacture of the components is a problematic stage. Through life cycle assessment the production chain is considered, starting by the silicon extraction, following by its purification, manufacture of the components and system installation. The stages of transport are also considered. Through the life cycle impact assessment method IMPACT 2002+, the results are divided between areas of protection: human health, ecosystem and resources. The budget constraint method is applied to obtain the economic value of these impacts. The system considered, a 570 kWp plant, presented environmental costs higher than other renewable energy sources but much lower than fossil fuel sources and four times lower than the costs of the Brazilian electric mix. Limitations are inherent to the analysis such as the fact that the database which represents the production chain doesn't reflect the most recent industrial processes, which could led to better results.*

***Key words****: Environmental Economic Valuation, Life Cycle Assessment, Solar Photovoltaic Energy*