

# ESTADO DA ARTE DE INDICADORES AMBIENTAIS DO CICLO DE VIDA DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: ENERGIA EMBUTIDA E TEMPO DE RETORNO DA ENERGIA

**Marinna Pivatto** – marinnapivatto@gmail.com

**Julia Possebon**

Universidade Federal da Santa Catarina, Departamento de Engenharia de Produção

**Fernando Ruttkay**

Universidade Federal da Santa Catarina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo

**Ricardo Rütther**

Universidade Federal da Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil

## 7.2. Impactos sociais, econômicos e ambientais de energias renováveis

### **Resumo.**

Nos últimos anos, o aumento significativo da utilização da energia solar fotovoltaica na geração de eletricidade, juntamente com suas diversas vantagens financeiras, despertou interesse em compreender os impactos ambientais associados ao seu ciclo de vida completo. Este artigo emprega a Análise do Ciclo de Vida (ACV), ou Life Cycle Analysis (LCA), para investigar essa questão. A ACV aborda variáveis como tecnologia de módulo fotovoltaico, eficiência e configuração de instalação, proporcionando uma análise abrangente dos sistemas fotovoltaicos. Um indicador-chave, o Tempo de Retorno da Energia (TRE), denominado em inglês Energy Payback Time (EPBT), emerge da ACV e é central neste estudo. Dez artigos científicos internacionais que utilizaram a ACV para calcular o TRE são minuciosamente revisados, abordando diferentes cenários e perspectivas críticas dos autores. O artigo inicia com uma introdução à metodologia da ACV e as variáveis essenciais para o cálculo do TRE. Em seguida, explora os resultados para diversas tecnologias de módulos fotovoltaicos e as abordagens de instalação. Além disso, analisa a variação da Energia Embutida conforme diferentes processos de fabricação dos módulos. O TRE é analisado sob várias perspectivas, revelando a influência dos processos de fabricação dos módulos de silício e a variação na eficiência dos módulos, dependendo do modelo e dos componentes. Em resumo, este artigo busca contribuir para uma compreensão mais aprofundada do TRE e sua relevância na avaliação da sustentabilidade dos sistemas fotovoltaicos.

**Palavras-chave:** Energia Solar Fotovoltaica, Tempo de Retorno da Energia, Análise do Ciclo de Vida

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a tecnologia solar fotovoltaica vem ganhando escala em todo o mundo. De acordo com a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), a energia solar experimenta um crescimento anual impressionante e consistente. Em 2011, a capacidade instalada acumulada em todo o mundo era de 74 GW, mas em 2023 esse número aumentou exponencialmente, devendo ultrapassar os 1300 GW de potência instalada, representando um aumento de mais de 17 vezes em pouco mais de uma década. Contudo, os impactos ambientais associados a essa tecnologia ainda não foram completamente elucidados. Este artigo se insere nesse contexto, buscando contribuir para o estado da arte do tema. Para isso, foi estudada a metodologia da Análise do Ciclo de Vida (ACV), também conhecida como Life Cycle Analysis (LCA) em inglês. A ACV proporciona uma análise abrangente dos sistemas fotovoltaicos, levando em consideração variáveis como tipo de módulo, eficiência, configuração de instalação, localização e outros fatores de influência.

Um dos indicadores ambientais cruciais que emerge da ACV é o Tempo de Retorno da Energia (TRE), denominado em inglês Energy Payback Time (EPBT) (Gerbinet *et al.* 2014). O objetivo deste estudo é oferecer um panorama geral desta área, juntamente com uma análise crítica das conclusões apresentadas em dez artigos científicos internacionais de revistas conceituadas. A pesquisa dos artigos foi conduzida no Scopus, inicialmente utilizando a *string* mais genérica, resultando em 147 artigos identificados. Após uma análise preliminar, a *string* foi refinada para excluir artigos relacionados à energia solar térmica. A última *string* resultou em 30 artigos. A seleção dos dez artigos utilizados neste trabalho foi baseada no maior número de citações, o que explica a inclusão de alguns artigos mais antigos, datando de 1996 a 2017. Dois dos artigos escolhidos são de revisão da literatura e os outros oito são estudos de caso. Esses artigos utilizaram a metodologia da ACV para calcular o TRE de sistemas fotovoltaicos, considerando diferentes tipos de módulos, configurações de instalações, locais geográficos, níveis de eficiência e definições de fronteiras de sistema.

A primeira seção do artigo inicia com uma breve explanação sobre a metodologia da ACV e esclarece quais variáveis são essenciais para o cálculo do TRE. Em seguida, é apresentada uma análise das diversas tecnologias de módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado, bem como as distintas abordagens de instalações adotadas. Por fim, é

detalhado o processo de fabricação dos módulos fotovoltaicos, destacando seu impacto significativo nos resultados do TRE.

Ao longo do artigo, é apresentada uma revisão minuciosa dos dez artigos selecionados, comparando diferentes cenários e incluindo a perspectiva crítica dos autores ao final de cada seção. Cabe ressaltar que o critério de seleção dos artigos foi o maior número de citações, sendo assim, alguns artigos podem conter mais de cinco anos de publicação. Para validar as informações encontradas nos referidos artigos, será feita uma análise comparativa com os resultados encontrados em artigos recentes.

Os dez estudos investigados abordaram a utilização de módulos fotovoltaicos confeccionados a partir de diversos materiais e tecnologias. De acordo com os resultados apresentados na Fig. 1, aproximadamente 36% dos ensaios se concentraram na análise de módulos FV de silício multicristalino, também referidos como Poli-Si ou Multi-Si. Por outro lado, os módulos FV monocristalinos de silício também receberam considerável atenção, correspondendo a 27% das pesquisas (conforme Fig. 1). Os módulos de silício amorfo e telureto de cádmio (CdTe) foram temas ligeiramente menos recorrentes, representando cerca de 11% cada, mas mantendo uma relevância substancial no contexto deste estudo. Por fim, a tecnologia menos explorada foi a de Ribbon silício, com uma representação de apenas 2%.

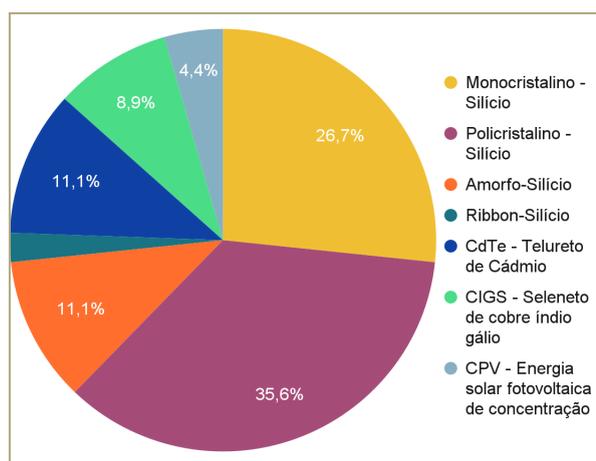


Figura 1 - Distribuição (%) das diferentes tecnologias de Módulos FV presente nos artigos analisados

Dentre os módulos fotovoltaicos analisados, os módulos FV monocristalino e policristalino pertencem à categoria dos módulos de Silício. Por outro lado, os módulos Amorfo silício, Ribbon, Telureto de Cádmio e CIGS se enquadram na categoria dos módulos de filme fino, caracterizados por uma eficiência mais baixa em comparação com os módulos de silício. Conforme destacado na revisão sistemática de literatura realizada por Gerbinet *et al.* (2014), a eficiência dos módulos de Silício variou de 12,5% a 16% para a maioria dos sistemas fotovoltaicos atualmente em operação, enquanto os módulos de filme fino apresentaram uma eficiência na faixa de 6,3% a 10%. Cabe ressaltar que, atualmente, a quase totalidade dos módulos de silício monocristalino encontrados no mercado tem eficiência superior a 20% e vários ultrapassam a marca dos 22%.

No que diz respeito ao tipo de instalação dos sistemas fotovoltaicos, conforme demonstrado na Fig. 2, foram identificados 39 casos em que os módulos foram instalados nos telhados de residências ou edifícios. Em 19 casos, considerou-se a instalação de estruturas metálicas fixas no solo, enquanto apenas 4 estudos avaliaram a instalação em solo com o uso de estruturas metálicas do tipo seguidor solar. Por fim, 4 pesquisas investigaram o TRE de sistemas fotovoltaicos instalados nas fachadas de edifícios.

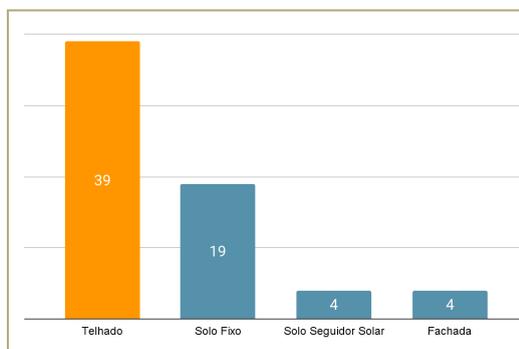


Figura 2 - Quantidade por tipo de instalação de sistemas fotovoltaicos

## 2. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

A crescente adoção da geração fotovoltaica levanta questões importantes relacionadas aos impactos ambientais e à eficiência energética ao longo de todo o ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos. Neste sentido, as seções a seguir exploram a fundo o indicador Tempo de Retorno da Energia (TRE) e sua importância na avaliação da sustentabilidade desses sistemas. Também são abordados os componentes-chave que influenciam o cálculo do TRE, discutindo as variáveis relacionadas à energia embutida e à saída total de energia do sistema, bem como suas implicações para a geração de energia fotovoltaica de maneira mais sustentável.

### 2.1 Avaliação de Ciclo de Vida

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é geralmente usada para investigar e avaliar os impactos ambientais de um determinado produto ou sistema causados ou necessários para sua existência. Portanto, dois indicadores ambientais populares de ACV, o tempo de retorno da energia (TRE) e o tempo de retorno de gases de efeito estufa (GPBT), podem ser usados para medir a sustentabilidade da tecnologia fotovoltaica. (Wong *et al.* 2016).

Para correta análise do indicador, é de extrema importância que o estudo indique qual a fronteira está sendo considerada. A Fig. 3 apresenta a fronteira mais completa que deveria ser utilizada em todos os estudos; porém são poucos estudos que calculam o TRE considerando a energia embutida desde o processo de fabricação até a reciclagem/descarte dos materiais do sistema fotovoltaico.

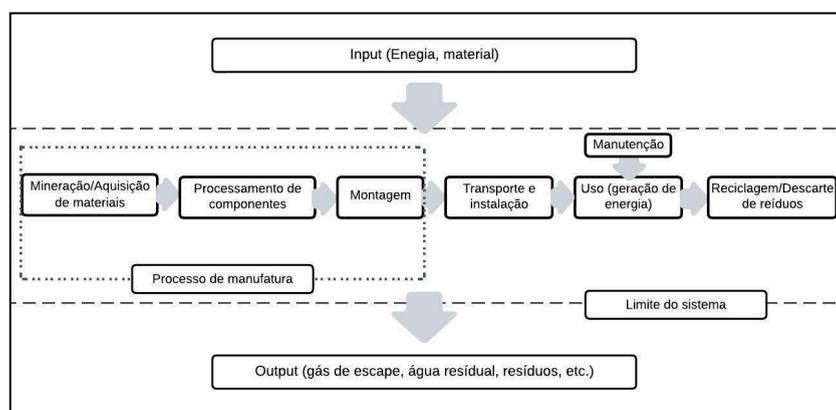


Figura 3 - Fronteira do sistema fotovoltaico Multi-Si recomendada por Wong *et al.* (2016)

Fonte: Wong *et al.* (2016)

Majoritariamente os artigos apresentaram TRE considerando duas fronteiras: (1) a fronteira da fabricação até o fim da vida útil, o que desconsidera a energia desprendida para descomissionar o sistema, transportar e reciclar os equipamentos; (2) a fronteira da fabricação até a instalação do sistema fotovoltaico, desconsiderando então toda energia demandada para a operação, manutenção, descomissionamento, transporte e reciclagem do sistema fotovoltaico.

Além da importância da fronteira para o cálculo de TRE, Zhai e Williams (2010) analisam o método de cálculo informando que há três formas de avaliar o ciclo de vida, sendo elas: Avaliação do Ciclo de Vida baseada na soma dos processos, ou Soma comum de Processos (ACV), o método Econômico de Entradas e Saídas (EIO ACV) e a metodologia Híbrida que utiliza os dois métodos anteriormente citados.

O método Econômico de Entradas e Saídas (EIO ACV) estima os materiais e recursos energéticos necessários e as emissões ambientais resultantes de atividades em nossa economia, trazendo questões financeiras à análise do ciclo de vida tradicional. Este método foi teorizado e desenvolvido pelo economista Wassily Leontief na década de 1970. Pesquisadores do Green Design Institute da Carnegie Mellon University operacionalizam o método de Leontief em meados da década de 1990.

O método ACV Híbrida, utilizado por Zhai e Williams (2010), refere-se genericamente a qualquer método que combine análise de soma de processos comum e o método econômico (EIO-ACV) para reduzir as incertezas. Existem várias abordagens para a ACV híbrida.

Além disso, Zhai e Williams (2010) relatam a relação entre a energia embutida calculada através do processo comum de soma (ACV) e do processo de EIO ACV, e concluem que a expansão dos limites do sistema usando o híbrido ACV aumentou em 60% os impactos ambientais do ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos, ou seja, maior Energia Embutida (MJ/m<sup>2</sup>) quando utilizado o método híbrido. Com isso, os autores pontuam que a abordagem híbrida deve ser fundamental na avaliação dos impactos da gama de produtos e tecnologias e indicam que trabalhos futuros são necessários para desenvolver métodos híbridos e avaliar quando e como aplicá-los.

Nenhum outro artigo analisado neste trabalho calculou o TRE ou a Energia Embutida utilizando este método híbrido ACV apresentado por Zhai e Williams (2010).

## 2.2 Tempo de Retorno Da Energia - TRE

Segundo Cucchiella e Dadamo (2012), o Tempo de Retorno da Energia (TRE) é a analogia energética ao retorno financeiro. Ele quantifica o tempo que leva para que a energia produzida após a instalação do gerador fotovoltaico (em termos de energia primária equivalente) seja igual à energia total necessária para produzi-la (incluindo a carga energética dos materiais, fabricação, coleta e descarte). Ou seja, a quantidade de anos que um sistema fotovoltaico deve operar antes de gerar energia suficiente para igualar a quantidade consumida. Isto é representado pela fórmula abaixo onde  $E_{IN}$  é a Energia Embutida durante todo ciclo de vida do sistema dividido pela  $E_{OUT}$  que é a energia produzida pelo sistema neste mesmo período.

$$TRE = \left[ \frac{E_{IN}}{E_{OUT}} \right] \quad (1)$$

### 2.2.1 Energia Embutida ( $E_{in}$ )

A energia embutida de um objeto representa a quantidade total de energia primária consumida em sua fabricação, entrega ao local, incluindo a extração das matérias-primas necessárias, transporte e descarte. Vale ressaltar que estas variáveis são definidas previamente na fronteira da ACV.

O objetivo de todo sistema de geração é reduzir os impactos ambientais com processos de extração e fabricação de alta eficiência e o uso de boas práticas ao longo de todo ciclo de vida do sistema (Goe e Gustad, 2014).

A Fig. 4 mostra o que significa cada variável que impacta positivamente ou negativamente no cálculo da Energia Embutida de um sistema. Vale ressaltar que o  $E_{BOS}$  significa a energia utilizada na fabricação e transporte dos outros componentes elétricos e os componentes mecânicos do sistema fotovoltaico. Os componentes elétricos do BOS incluem os inversores, fiações elétricas e dispositivos de controle eletrônico, enquanto os componentes mecânicos do BOS incluem os materiais de montagem e estruturas metálicas.

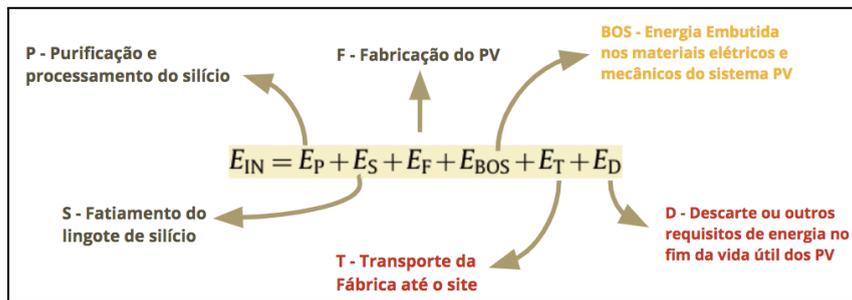


Figura 4 - Fórmula da Energia Embutida com significado de todas variáveis  
Fonte: Adaptado de Cucchiella e Dadamo (2012)

Zhai e Williams (2010) tiveram como objetivo de seu trabalho informar que o progresso tecnológico reduziu significativamente os impactos ambientais dos módulos fotovoltaicos. Assim como relatado por Wong *et al.* (2016), houve uma diminuição gradual na necessidade de energia incorporada para ambas as tecnologias fotovoltaicas. A tecnologia no processo de fabricação cresceu rapidamente na indústria fotovoltaica e melhorias contínuas ocorreram (e.g. células fotovoltaicas tipo-n, tecnologia TOPCON, heterojunções), incluindo a diminuição da espessura da lâmina de Si, com conseqüente redução de custo e conteúdo energético.

Na última década, a tecnologia fotovoltaica testemunhou avanços significativos tanto nas tecnologias de silício (Si) quanto nas de telureto de cádmio (CdTe), evoluindo para seus estados atuais. O silício passou por diversas otimizações em células, módulos e processamento, como por exemplo a passivação da superfície traseira da célula com óxido de alumínio, processos para reduzir a degradação induzida pela luz, reduções de custo em wafers de silício monocristalino Czochralski por meio do processamento de lingotes e uso de serras de fio de diamante. Essas transformações tecnológicas, aliadas a mecanismos de grande escala, foram responsáveis pela redução no custo dos módulos, pelo aumento nas eficiências médias de 15% em 2010 para 22% em 2020, e ainda, pela diminuição na energia embutida, conforme relatado em publicações, chegando redução de até 77% entre 2010 e 2020 para módulos FV de silício, como ilustrado na Fig. 5. (Wikoff *et al.*, 2022)

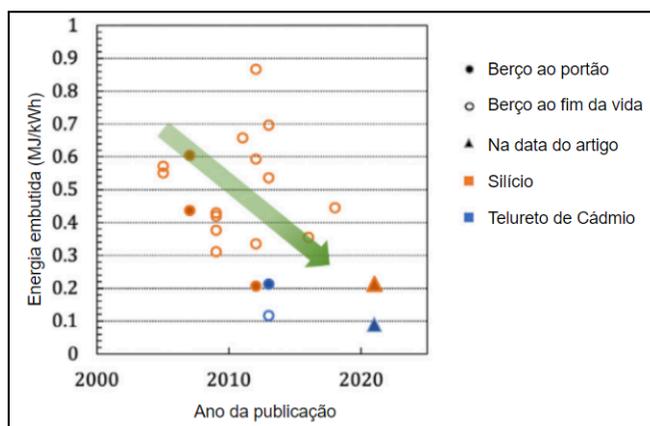


Figura 5 - Energia Embutida calculada ao longo dos anos de 2000 a 2020 para o ciclo de vida de módulos de silício e de telureto de cádmio  
 Fonte: Wikoff *et al.* (2022)

Alguns artigos apresentaram a porcentagem com que cada variável impacta no montante total da energia embutida. Lu e Yang (2010) calcularam seus indicadores desconsiderando a energia embutida para descomissionamento e descarte do sistema fotovoltaico. A Fig. 6 indica que o processo de purificação do silício representa quase 50% da energia embutida, e a energia embutida do BOS, componentes elétricos e mecânicos representa 29%.

O mesmo padrão aparece no artigo do Cucchiella e Dadamo (2012), conforme apresentado na Fig. 7, porém nesta análise o descarte foi levado em consideração e representa 1,7% do total de energia embutida deste sistema fotovoltaico.

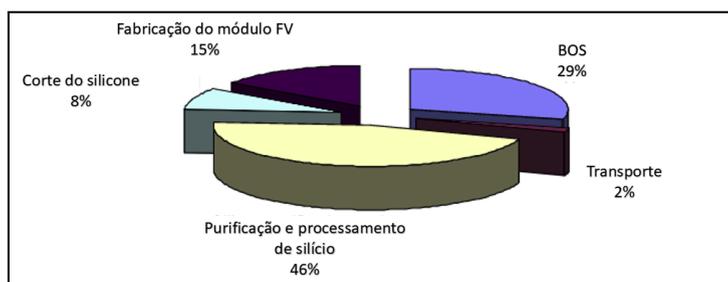


Figura 6 - Gráfico de pizza da energia embutida usada no sistema BIPV de telhado  
 Fonte: Lu e Yang (2010).

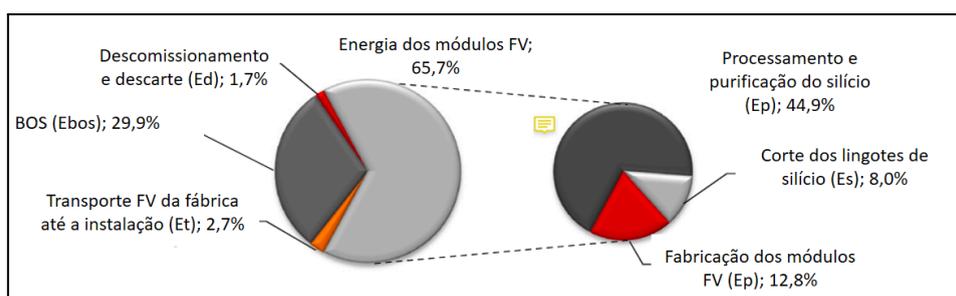


Figura 7 - % de Energia embutida utilizada no sistema BIPV de telhado.  
 Fonte: Cucchiella e Dadamo (2012)

Como ponderação, vale destacar que os estudos relativos à reciclagem de módulos fotovoltaicos estão progredindo atualmente. Os artigos no tema mostram que esse processo não é trivial e requer um consumo considerável de energia. Ansanelli *et al.* (2021) conduziram uma análise de ciclo de vida abrangente, abordando todo o processo de reciclagem, que envolve métodos mecânicos, térmicos e químicos para separar os componentes dos módulos fotovoltaicos. O resultado revelou que a energia total incorporada na reciclagem de módulos multicristalinos de silício é de 2.587,5 kWh por tonelada. Portanto, é importante incluir os gastos energéticos de descomissionamento e reciclagem nas avaliações de ACV e TRE de sistemas fotovoltaicos.

### 2.2.2 Saída Total de Energia do Sistema (E<sub>out</sub>)

Saída total de energia do sistema (E<sub>out</sub>) significa a geração total de energia durante todo o ciclo de vida calculado em kWh. A Fig. 8 indica todas variáveis que influenciam no cálculo da geração total do sistema fotovoltaico. Vale ressaltar que todas as variáveis dependem do local onde o sistema está instalado e dos materiais escolhidos (módulos fotovoltaicos, inversores, estruturas metálicas etc.). Ou seja, quanto maior a eficiência do módulo FV e insolação média do local, maior o resultado do E<sub>out</sub> e provavelmente o sistema levará menos anos para gerar a quantidade consumida de energia.

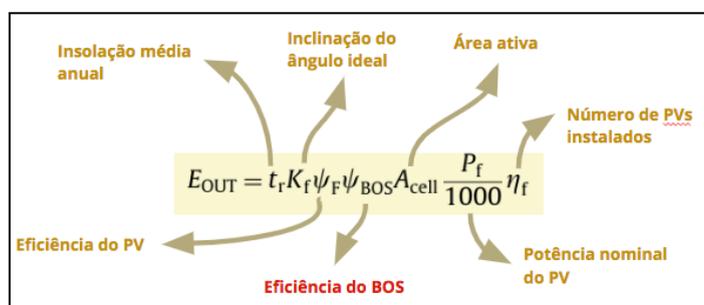


Figura 8 - Fórmula da Energia Gerada (E<sub>out</sub>) com significado de todas variáveis  
Fonte: Adaptado de Cucchiella e Dadamo (2012)

Considerando os valores de E<sub>out</sub>, Cucchiella e Dadamo (2012) analisaram sistemas fotovoltaicos fixos em telhados de três cidades distintas, Milão, Roma e Palermo. A principal diferença entre estas cidades é a insolação anual de cada uma, sendo a menor em Milão 1383 kWh/m<sup>2</sup>.ano e a maior em Palermo 1623 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Além da diferença de insolação, foram analisadas diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos a fim de identificar qual a melhor tecnologia para cada cidade da Itália. A Fig. 9, indica que independente da insolação das cidades, o maior E<sub>out</sub> se dá a partir do módulo FV de Silício Monocristalino, devido à sua maior eficiência frente às outras tecnologias. Já em relação às cidades, Palermo possui o maior E<sub>out</sub> para todos os tipos de tecnologia visto que sua insolação é maior que a de Milão e Roma.

Por fim, temos o pior caso sendo o uso de módulos de Telureto de Cádmio (CdTe) na cidade de Milão, e o melhor cenário utiliza módulos de Silício Monocristalino na cidade de Palermo. Em contrapartida, o resultado do tempo de retorno da energia (TRE) para estes mesmos casos não segue o padrão do E<sub>out</sub> conforme se vê na Fig. 10. Isso acontece, pois conforme mostrado nas seções acima, o TRE depende também do E<sub>in</sub> e os resultados encontrados por Cucchiella e Dadamo (2012) foram: no melhor cenário a recomendação seria utilizar CdTe em Palermo, 1,8 anos de TRE; o pior cenário seria utilizar módulos policristalinos em Milão, 2,9 anos de TRE.

	Tipo de célula FV			
	CdTe	CIS	Poli. -SI	Mono-SI
Milão	1196	1262	1382	1488
Roma	1306	1379	1509	1625
Palermo	1403	1481	1621	1746

Figura 9 - E<sub>Out</sub> de sistemas módulos FV (Telhado - Fixo) com tecnologias diferentes e localizados em 3 cidades - kWh/ano:

Fonte: Cucchiella e Dadamo (2012)

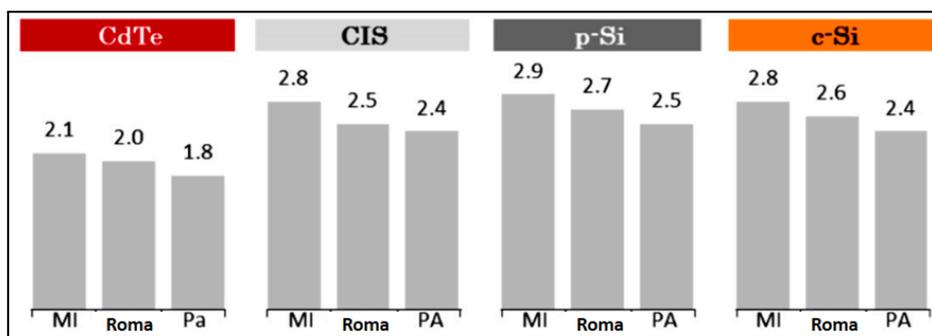


Figura 10 - TRE em anos de sistemas módulos FV (Telhado - Fixo) com tecnologias diferentes e localizados em 3 cidades da Itália - kWh/ano:  
 Fonte: Cucchiella e Dadamo (2012)

Além de analisar o  $E_{out}$  em relação ao local e à insolação, é possível analisar variando o tipo de instalação como apresentado no artigo do Halasah *et al.* (2013). A Fig. 11 representa a energia gerada em kWh/m<sup>2</sup> de diferentes sistemas e módulos instalados no mesmo local (insolação igual em todos os casos). Desta forma, é possível analisar que o melhor cenário seria instalar módulos de silício monocristalino (Single-Si) em um sistema com rastreamento solar de solo; o sistema é chamado de Polar e se move nos eixos Norte-Sul e Leste-Oeste de forma a seguir o sol e ser o mais eficiente possível. Conforme Fig. 11 abaixo, este sistema gera 315kWh/m<sup>2</sup>.

O pior cenário seria instalar um sistema de módulos de Amorfo Silício em um sistema fixo (que não segue o sol) em ângulo zero em relação ao solo, perdendo assim a possibilidade de otimizar a geração devido a insolação ideal ser no ângulo da latitude da cidade em questão (104 kWh/m<sup>2</sup>). É importante observar que esta análise se limita apenas à componente  $E_{out}$ . Para calcular o EPBT, é necessário considerar a energia embutida das diversas topologias. Dependendo da energia embutida na fabricação de cada topologia, o  $E_{out}$  mais eficiente não necessariamente resultará no menor EPBT.

Tipo FV	Rastreamento de instalações			Estacionário	
	Polar	N-S	L-O	Inclinação = latitude	Inclinação = 0
CIS	271	259	234	223	205
CdTe	264	256	231	220	202
Ribbon-Si	294	282	254	242	222
Mono-Si	315	302	273	260	238
Multi-Si	303	290	262	250	229
a-Si	137	131	119	113	104

Figura 11 - Produção anual total de energia para módulos fotovoltaicos (sem perdas de sombreamento).  $E_{Out}$  de diversos sistemas de módulos FV (variando tecnologia e tipo de instalação) localizados na mesma cidade - kWh/m<sup>2</sup>.  
 Fonte: Halasah *et al.* (2013)

### 3. FABRICAÇÃO E TECNOLOGIAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A métrica de energia embutida e o indicador de TRE variam consideravelmente em relação aos diferentes processos de fabricação dos módulos FV, visto que para os módulos de silício os processos variam bastante em relação à purificação do silício e consequentemente sua eficiência. Além disso, os resultados são altamente dependentes da eficiência do módulo FV que varia bastante a depender do tipo de módulo e seus componentes.

#### 3.1 Fabricação

Wong *et al.* (2016) apresentaram um processo de fabricação de silício que começa com a mineração de sílica/quartzo (SiO<sub>2</sub>), seguida por uma redução carbotérmica em um forno a arco. Esse processo consome muita energia e emite CO<sub>2</sub> para a atmosfera. A sílica é inicialmente transformada em silício de grau metalúrgico (MG-Si), mas precisa

passar por purificação para atingir graus de pureza mais elevados, como o silício de grau eletrônico (EG-Si) ou o silício de grau solar (SoG-Si). A purificação pode ser realizada por diferentes métodos, como o processo Siemens, o processo Siemens modificado, e o crescimento de monocristais acontece pelo processo Czochralski. O processo Siemens é crucial para alcançar altos níveis de pureza, utilizando Hidrogênio (H<sub>2</sub>) e triclorosilano (SiHCl<sub>3</sub>) em altas temperaturas (1100-1200°C). No entanto, o principal inconveniente desse processo é seu alto consumo de energia devido às altas temperaturas de operação na câmara de reação.

Desta forma é possível identificar através do fluxo de processo, Fig. 12, que o módulo que mais passa por processos de fabricação é o Monocristalino de Silício. Já o Multicristalino de Silício passa pelo processo de cristalização, porém não pelo processo denominado Czochralski; desta forma, sua energia embutida é menor. Já o Ribbon e o Amorfo Silício, não passam por processo de cristalização e com isso sua energia embutida é mais baixa ainda.

Esta relação de Energia Embutida, tecnologia e processo da fabricação é também analisada por De Wild (2013) e será apresentada na próxima seção.

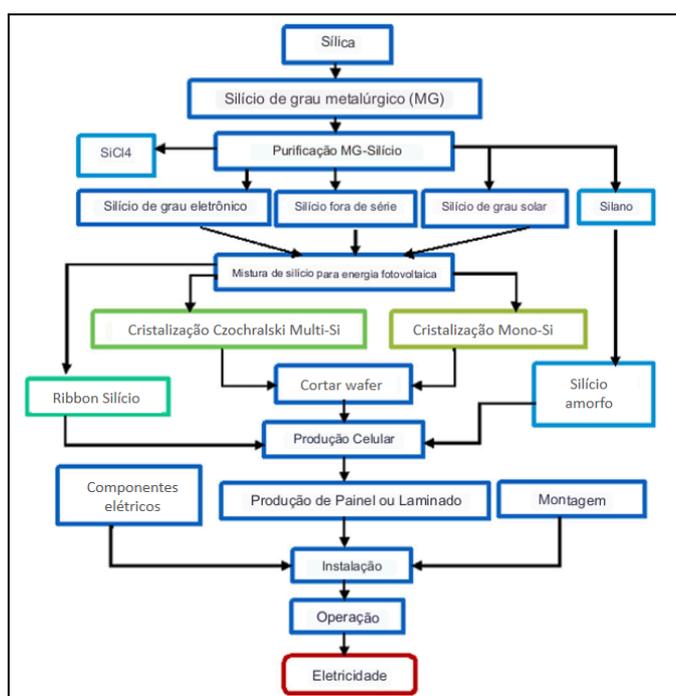


Figura 12 - Fluxograma do processo de Fabricação dos módulos de silício cristalino, Ribbon e Amorfo Silício  
Fonte: Wong *et al.* (2016)

Ainda sobre o processo produtivo dos módulos fotovoltaicos e a energia embutida no processo, Wong *et al.* (2016) mostrou em números a diferença da energia consumido pelo processo de cristalização do silício entre o módulo FV Monocristalino (2.300 MJ/m<sup>2</sup>) versus Multicristalino (750 MJ/m<sup>2</sup>).

### 3.2 Tecnologias de Módulos

De Wild (2013) analisou diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos sendo dois deles da categoria de Silício Cristalino: silício monocristalino (mono-Si), silício policristalino (multi-Si) e o restante da categoria Filme Fino: Amorfo Silício (a-Si), MicroAmorfo (μm-Si), Telureto de Cádmi (CdTe) e CIGS (cobre-índio-gálio-selênio). Nesta análise foi considerado fabricação desses módulos na mesma matriz energética; energia hidrelétrica para produção de lingotes, lâminas, células solares e para os módulos foi considerado eletricidade UCTE, uma irradiação em ângulo otimizado de 1700 kWh/(m<sup>2</sup> ano); excluindo instalação, operação e manutenção e fase de fim de vida.

Desta forma, a Fig. 13 mostra a diferença do TRE entre as tecnologias. É possível verificar que a cristalização do silício (em rosa) representa uma quantidade significativa de energia embutida e faz com que o módulo Monocristalino de Silício tenha o maior TRE de 2 anos, mesmo que sua eficiência seja maior que do outros (14,8% para esta tecnologia em 2013). Já o módulo de Telureto de Cádmi (CdTe) possui o menor TRE, aproximadamente 0,7 anos, devido à sua baixa energia embutida de fabricação. Em relação à eficiência, este modelo possui a terceira melhor eficiência entre os modelos analisados, 11,9%.

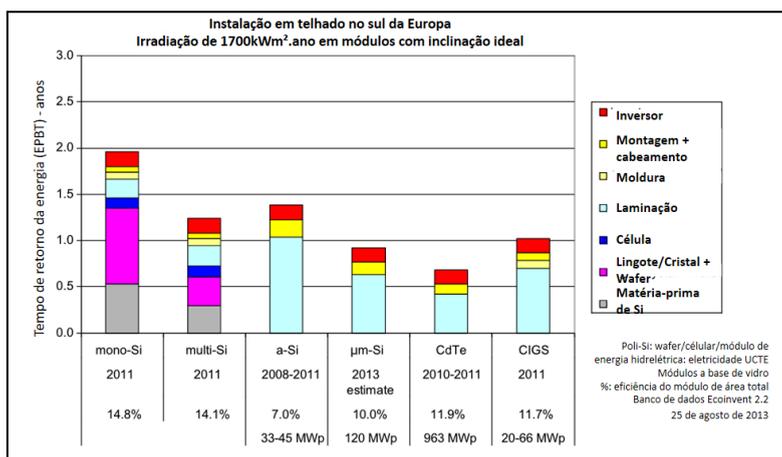


Figura 13 - TRE de sistemas comerciais com irradiação fixa de 1700 kWh/m<sup>2</sup>ano para diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos  
Fonte: De Wild (2013)

#### 4. CONCLUSÕES

Neste estudo, foram examinados dez artigos científicos de alcance internacional, focalizando a temática da Energia Embutida (EE) e do Tempo de Retorno da Energia (TRE) como indicadores de sustentabilidade na Análise do Ciclo de Vida (ACV). Esses artigos desempenharam um papel crucial na explanação dos conceitos subjacentes e das variáveis que exercem influência sobre os resultados da EE e do TRE.

Evidencia-se que a evolução tecnológica voltada para a redução da energia embutida no processo de cristalização do silício, bem como a redução da espessura da lâmina de silício, desempenham papel fundamental na diminuição do TRE. Além disso, a investigação aprofundada do uso de células recicladas apresenta potencial para reduzir ainda mais a energia embutida durante a fabricação. A otimização da saída total de energia do sistema fotovoltaico ( $E_{out}$ ) pode ser alcançada por meio da seleção cuidadosa de estruturas metálicas adequadas para a fixação, bem como do ajuste do ângulo de instalação, visando aumentar a eficiência do sistema e, conseqüentemente, reduzir o TRE.

Os resultados da análise indicam uma considerável variação no tempo de retorno da energia nos artigos, variando de 0,7 a 20 anos, destacando o impacto significativo da combinação das variáveis discutidas neste estudo nos sistemas. Ao examinar os artigos, observa-se que essa variação ocorre por várias razões. A utilização de diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos, por exemplo, resultou em uma variação de 1,3 anos no EPBT. O local de instalação, dentro do mesmo país com uma diferença de 15% na irradiância média anual (kWh/m<sup>2</sup>) entre cidades analisadas da Itália, teve uma variação mínima de 0,4 meses no EPBT.

Além disso, devido às diferentes energias primárias dos países, a instalação de sistemas de telhado com irradiância de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/ano na China e União Europeia pode variar até 4 anos, sendo a União Europeia apresentando o menor EPBT na análise. Países como Japão e China se destacaram com EPBTs mais elevados devido às suas características energéticas específicas. Por fim, a maior variação foi observada no tipo de instalação, especialmente no Japão, onde a diferença é de 8 anos entre sistemas instalados na melhor irradiância anual e sistemas de fachada instalados na pior irradiância anual.

Independentemente do valor máximo de TRE encontrado nos artigos, considerando o ciclo de vida típico de um sistema fotovoltaico, aproximadamente 30 anos, a geração de energia a partir de fontes fotovoltaicas se apresenta altamente atrativa do ponto de vista de indicadores de sustentabilidade.

Por fim, ressalta-se a relevância crítica das fronteiras estabelecidas para a análise de ciclo de vida (ACV). Observou-se que a maioria dos artigos não incorpora a Energia Embutida no contexto do descarte ou reciclagem, o que pode resultar na subestimação do tempo real de energia embutida e, conseqüentemente, em valores menores de TRE.

#### REFERÊNCIAS

- Ansanelli, G., Fiorentino, G., Tammara, M., & Zucaro, A. (2021). A Life Cycle Assessment of a recovery process from End-of-Life Photovoltaic Panels. *Applied Energy*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116727>
- Burg, B. R., Ruch, P., Paredes, S., & Michel, B. (2017). Effects of radiative forcing of building integrated photovoltaic systems in different urban climates. *Solar Energy*, 147, 399–405. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.004>
- Chemisana, D. (2011). Building integrated concentrating photovoltaics: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 15, Issue 1, pp. 603–611). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.017>
- Cucchiella, F., & Dadao, I. (2012). Estimation of the energetic and environmental impacts of a roof-mounted building-integrated photovoltaic systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Issue 7, pp. 5245–5259). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.034>

- de Wild-Scholten, M. J. (2013). Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 119, 296–305. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.037>
- Gerbinet, S., Belboom, S., & Léonard, A. (2014). Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 38, pp. 747–753). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.043>
- Rüther, Ricardo. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil / Ricardo Rüther. – Florianópolis: LABSOLAR, 2004.
- Goe, M., & Gaustad, G. (2014). Strengthening the case for recycling photovoltaics: An energy payback analysis. *Applied Energy*, 120, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.036>
- Halasah, S. A., Pearlmutter, D., & Feuermann, D. (2013). Field installation versus local integration of photovoltaic systems and their effect on energy evaluation metrics. *Energy Policy*, 52, 462–471. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.063>
- Lu, L., & Yang, H. X. (2010). Environmental payback time analysis of a roof-mounted building-integrated photovoltaic (BIPV) system in Hong Kong. *Applied Energy*, 87(12), 3625–3631. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.06.011>
- Wilson, R., & Young, A. (1996). The embodied energy payback period of photovoltaic installations applied to buildings in the U.K. *Building and Environment*, 31(4), 299–305. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(95\)00053-4](https://doi.org/10.1016/0360-1323(95)00053-4)
- Wong, J. H., Royapoor, M., & Chan, C. W. (2016). Review of life cycle analyses and embodied energy requirements of single-crystalline and multi-crystalline silicon photovoltaic systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 58, pp. 608–618). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.241>
- Wikoff, H. M., Reese, S. B., & Reese, M. O. (2022). Embodied energy and carbon from the manufacture of cadmium telluride and silicon photovoltaics. *Joule*, 6(7), 1710–1725. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.06.006>
- Zhai, P., & Williams, E. D. (2010). Dynamic hybrid life cycle assessment of energy and carbon of multicrystalline silicon photovoltaic systems. *Environmental Science and Technology*, 44(20), 7950–7955. <https://doi.org/10.1021/es1026695>

#### STATE OF THE ART OF LIFE CYCLE ENVIRONMENTAL INDICATORS: EMBODIED ENERGY AND ENERGY PAYBACK TIME OF PHOTOVOLTAIC MODULES

**Abstract.** *In recent years, the significant increase in the use of photovoltaic solar energy for electricity generation, along with its numerous financial advantages, has sparked interest in understanding the environmental impacts associated with its complete life cycle. This article employs Life Cycle Analysis (LCA) to investigate this issue. LCA addresses variables such as photovoltaic module technology, efficiency, and installation configuration, providing a comprehensive analysis of photovoltaic systems. A key indicator, Energy Payback Time (EPBT), emerges from LCA and is central to this study. Ten international scientific articles that used LCA to calculate EPBT are thoroughly reviewed, addressing different scenarios and critical author perspectives. The article begins with an introduction to LCA methodology and the essential variables for EPBT calculation. It then explores the results for various photovoltaic module technologies and installation approaches. Furthermore, it analyzes the variation in Embodied Energy for different module manufacturing processes. EPBT is examined from various perspectives, revealing the influence of silicon module manufacturing processes and the variation in module efficiency depending on the model and components. In summary, this article seeks to contribute to a deeper understanding of EPBT and its relevance in assessing the sustainability of photovoltaic systems.*

**Keywords:** *Photovoltaic Solar Energy, Energy Payback Time, Life Cycle Analysis*