



XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Avanços no desempenho das construções – pesquisa, inovação e capacitação profissional

12, 13 E 14 DE NOVEMBRO DE 2014 | MACEIÓ | AL

EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA E CONTEÚDO ENERGÉTICO DE PLACAS FOTOVOLTAICAS NA AMERICA LATINA

GARCIA, Juliana (1); OLIVEIRA, Lidiane (2); JOHN, V.M. (3)

(1) Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 11 3091 5459, e-mail: juliana.garcia@lme.pcc.usp.br, (2) e-mail: lidiane.oliveira@lme.pcc.usp.br (3) e-mail: vanderley.john@lme.pcc.usp.br

RESUMO

Os sistemas fotovoltaicos (PV) têm sido apresentados como uma solução para a escassez de energia com baixa poluição ambiental, mas o fato desses sistemas não emitirem gases do efeito estufa (GEE) durante a operação do sistema não significa que esse processo de geração de energia não possua impactos ambientais. O objetivo deste artigo é analisar a quantidade de emissões de gases do efeito estufa e o conteúdo energético dos sistemas PV segundo os índices de radiação solar média anual ($\text{kWh/m}^2/\text{ano}$) emitida em cada um dos países da América Latina. Os dados foram levantados em revisão bibliográfica de estudos de avaliação do ciclo de vida (ACV) dos sistemas PV. Foram analisados cinco tipos, cada um com células fotoelétricas de diferentes materiais. A quantidade de energia gerada por cada sistema PV foi calculada de acordo com os níveis de radiação solar atingidos nos países onde foram obtidos os dados da literatura. Após isso, estimou-se a quantidade de energia que o painel geraria com os níveis de radiação solar atingidos nos países da América Latina. Em seguida, calculou-se a quantidade de GEE de acordo com o cálculo da energia gerada por cada painel. Os resultados mostram que a produção de energia poderia ser superior em relação aos países europeus e asiáticos. Em todos os casos analisados o período de recuperação da energia é menor que a mínima vida útil esperada. Para o caso do Moni-Si, em alguns cenários o produto gasta metade de sua vida útil para recuperar a energia embutida na sua fabricação. Para os demais produtos (poli-Si, A-Si, CdTe e CIS) o período de recuperação da energia representa entre menos de 10 a 15% da sua vida útil. Observou-se que com menor radiação solar o aumento das emissões GEE é significativo e vice-versa.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida, sistemas fotovoltaicos, gases de efeito estufa, tempo de recuperação da energia.

ABSTRACT

The photovoltaic systems (PV) have been a solution to environmental pollution low levels in electricity shortage, in view of systems do not emit greenhouse gases (GHG) during the operation processes, this don't mean that these electricity generation processes don't have environmental impacts. The aim of this paper is to analyze the environment and sustainable performance of photovoltaic systems according to the average annual radiation rates ($\text{kWh/m}^2/\text{year}$) emitted on each Latin American country. The study data's were found by literature review about photovoltaic systems life cycle assessment (LCA). These were analyzed by five types, each one with different photoelectric cells material. Amount of power generated for each PV system was calculated according to the solar radiation levels achieved where the initial test was made for PV panels. Afterward, it was calculated amount of power generated by PV system would be able to produce with the average solar radiation levels achieved in Latin American countries. Subsequently, it was calculate the GHG's amount in relation to power generated calculated. The results show energy production could be higher compared to European and Asian countries. In all the cases the energy payback time is less than the minimum expected useful life. For the case of Moni-Si, in some scenarios the product spends half its life to retrieve the embedded energy in its manufacture. For other products (poly-Si, Al-Si, CdTe and CIS) energy payback time represents less between 10-15% of its useful life. It was observed that less solar radiation increase is significant GHG emissions and vice versa.

Keywords: life cycle assessment, photovoltaic system, GHG emission rate, energy payback time.

1 INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais devido à emissão de gases e outros poluentes e ao elevado consumo de recursos não renováveis são problemas diretamente relacionados com a geração e o uso de energia elétrica (Peng, L. Lu, and H. Yang 2013). Novas tecnologias para captação e transformação de energia renovável têm como propósito reduzir o impacto no meio ambiente, tanto na fabricação dos componentes, como na implantação e operação do sistema.

Os sistemas fotovoltaicos (PV) são um das soluções para produção de eletricidade, substituindo o uso de combustíveis fósseis na etapa de geração de eletricidade pela energia do sol. Os sistemas PV têm sido apresentados como uma solução para a escassez de energia com baixa poluição ambiental (Nishimura et al. 2010). A tecnologia PV oferece múltiplas soluções no âmbito da sustentabilidade. Em países onde não há condições para criar reservatórios de água para geração de hidrelétricas (Sueyoshi and Goto 2014), sistemas PV são utilizados conectados às redes elétricas principais, contribuindo com a geração durante a demanda de picos diurnos. A geração descentralizada pode diminuir as perdas por transmissão da energia a longas distâncias (R. Rüther and R. Zilles 2011).

O fato de gerar eletricidade diretamente do sol e de não consumir combustíveis fósseis e, conseqüentemente, não emitir gases do efeito estufa durante a operação do sistema, não significa que esse processo de geração de energia não possua impactos ambientais. Algumas etapas do ciclo de vida dos sistemas PV necessitam de grandes quantidades de energia, inclusive térmica. Dentre estas etapas estão os vários estágios de fabricação das células solares, a montagem do módulo PV, dos equipamentos de instalação, inversores, o transporte de todo material, instalação, manutenção e limpeza, desmontagem, descarte ou reciclagem (Peng, L. Lu, and H. Yang 2013).

Com a finalidade de pesquisar com mais profundidade o desempenho ambiental dos sistemas PV, muitos autores realizaram uma avaliação do ciclo de vida (ACV) para analisar os impactos ambientais resultantes. Para isso, os fluxos de entrada e saída dos sistemas produtivos devem ser levantados. Neste caso será realizada uma avaliação simplificada, utilizando os indicadores mais utilizados: período de recuperação da energia (PRE) e as emissões de gases de efeito estufa (GEE). PRE é tempo em anos no qual a energia investida durante o ciclo de vida é recuperada por meio da eletricidade gerada com o painel PV (Nieuwlaar and Alsema 1997). Para o cálculo destes dois indicadores foi necessário estimar a vida útil das células PV e dos demais componentes do sistema, dada em cada uma das referências pesquisadas.

A ACV é a melhor ferramenta para comparar soluções alternativas do ponto de vista ambiental. Como a geração de energia depende da média da radiação solar, os resultados obtidos nas análises das ACV não são universais, pois essa radiação varia de país para país. Além disso, existe a variação da intensidade das emissões de CO₂ na matriz energética, que pode ser de origem renovável ou não.

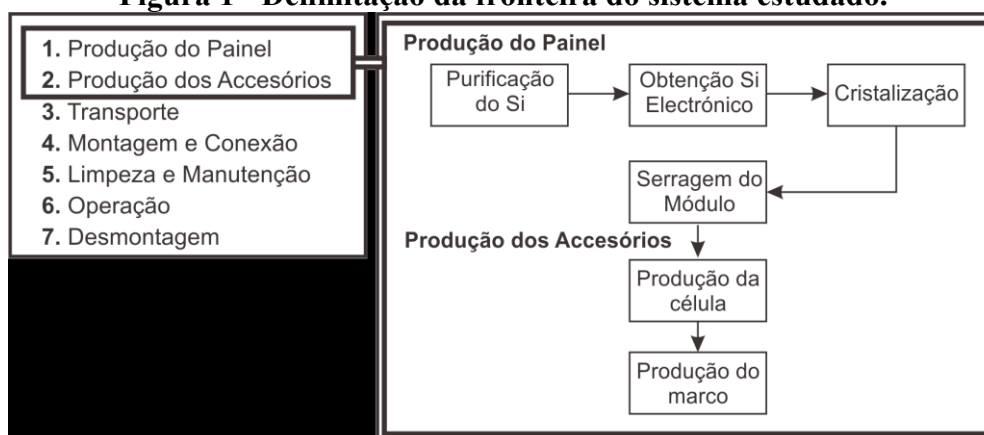
O objetivo deste artigo é analisar de forma simplificada o desempenho ambiental no que diz respeito às emissões de GEE dos sistemas PV segundo os índices de radiação solar média anual (kWh/m²/ano) emitida em cada país da América Latina. Para isso foram utilizados dados levantados em estudos de ACV de sistemas fotovoltaicos desenvolvidos em diferentes países da Europa e Ásia, referenciado na literatura citada ao longo deste trabalho.

2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A ACV é dividida em quatro fases: definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação (ABNT 2009). O objetivo da ACV dos sistemas PV é analisar o desempenho ambiental e sustentável segundo os índices de radiação solar média anual emitida em cada um dos países da América Latina, procurando confirmar se há uma diminuição da vida útil dos sistemas PV, em consequência do desgaste do material devido aos altos níveis de radiação solar.

A produção de um sistema PV é composta pelas seguintes etapas: produção do painel e dos acessórios, transporte do material, montagem, instalação e adaptação dos sistemas, limpeza e manutenção do painel e descarte ou reciclagem (Peng, L. Lu, and H. Yang 2013). No entanto, no presente estudo a fronteira é delimitada apenas pelas duas primeiras etapas do ciclo de vida (Figura 1). Na produção do painel estão incluídas atividades como extração e refino da matéria-prima e produção das células solares. Na produção dos acessórios é considerada a produção do marco ou suportes do painel. A etapa de transporte foi excluída, pois este dado não foi considerado nas fontes bibliográficas utilizadas. Além disso, as placas são transportadas como cargas marítimas, que tem baixas emissões mesmo para longas distâncias (Krauter and Ruthher 2004).

Figura 1 - Delimitação da fronteira do sistema estudado.



Fonte: Autor (2014)

A análise do inventário foi realizada a partir dos dados coletados na literatura. As variáveis levantadas foram matéria-prima das células condutoras, país onde o sistema foi inicialmente testado o painel, radiação solar do local de teste, módulo de eficiência do painel, vida útil estimada do painel, coeficiente de rendimento, período de recuperação da energia e GEE emitidos na fabricação de cada painel. Os dados do inventário são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

As matérias-primas das células condutoras variam em cinco tipos: silício monocristalino (mono-Si), silício policristalino (poli-Si), silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe) e cobre – índio – selênio (CIS). As duas últimas são filmes finos, mais conhecidos como *thin films*. Nas três primeiras, a etapa de maior consumo energético no processo produtivo dos painéis PV está relacionada ao refino da matéria-prima, ou seja, na redução do quartzo ao grau metalúrgico para a purificação do silício (Sherwani, Usmani, and Varun 2010; Varun, Bhat, and Prakash 2009). O consumo energético para o funcionamento da indústria e a produção de sistemas PV, está diretamente relacionado às emissões de CO₂, dado que a queima de combustíveis fósseis e o uso de recursos não renováveis desencadeia no aumento da geração de gases de efeito estufa.

Tabela 1. – Dados de inventário - Caracterização dos painéis PV.

MP	Fonte	Localização	Radiação Solar (kWh/m ² /ano)	Módulo de Eficiência (ME) (%)	Vida útil (anos)	PRE (anos)	GEE _{pvv} (gCO ₂ -eq./kWh)
Mono-Si	(Wilson and Young 1996)	Inglaterra	913	12	20	9,75	N/A
Mono-Si	(Kato et al.1998)	Japão	1427	12,2	20	8,9	61
Mono-Si	(Alsema and Wild-Scholten 2005)	Sul da Europa	1700	13,7	30	2,6	41
Mono-Si	(Alsema and Wild-Scholten 2005)	Sul da Europa	1700	12	30	2,1	35
Mono-Si	(Jungbluth et al. 2007)	Suíça	1117	14	30	3,3	N/A
Mono-Si	(Wild-Scholten 2009)	Sul da Europa	1700	14	N/A	1,75	30
Mono-Si	(Masakazu I., Komoto K., and Kurokawa K. 2010)	China	1702	N/A	25	2,5	50
Poli-Si	(Phylipsen and Alsema 1995)	Sul da Europa	1700	12	25	2,7	N/A
Poli-Si	(Kato et al. 1998)	Japão	1427	11,6	30	2,7	20
Poli-Si	(Alsema 2000)	Sul da Europa	1700	12	30	3,2	60
Poli-Si	(Ito et al. 2003)	China	1675	12,8	30	1,7	12
Poli-Si	(Battisti and Corrado 2005)	Itália	1530	10,7	30	3,3	N/A
Poli-Si	(Alsema and Wild-Scholten 2005)	Sul da Europa	1700	13,2	20	1,9	32
Poli-Si	(Pacca et al. 2007)	Estados Unidos	1359	12,9	30	2,1	63,5
Poli-Si	(Jungbluth et al. 2007)	Suíça	1117	13,2	20	2,9	N/A
Poli-Si	(Raugei et al. 2007)	Sul da Europa	1700	14	30	2,4	72
Poli-Si	(Wild-Scholten 2009)	Sul da Europa	1700	13,2	N/A	1,75	29
Poli-Si	(Masakazu I et al. 2010)	China	1702	N/A	25	2	43
a-Si	(Lewis and Keoleian 1997)	Estados Unidos	1974	5	N/A	3	N/A
a-Si	(Alsema 1998)	Nova Europa	1000	6	30	3,2	N/A
a-Si	(Alsema 2000)	Sul da Europa	1700	7	30	2,7	50
a-Si	(Jungbluth et al. 2007)	Suíça	1117	6,5	20	3,1	N/A
a-Si	(Pacca et al. 2007)	Estados Unidos	1359	6,3	30	3,2	34,3
a-Si	(Ito et al. 2008)	China	2017	6,9	30	2,5	15,6
a-Si	(Wild-Scholten 2009)	Sul da Europa	1700	6,6	N/A	1,4	24
CdTe	(Alsema 1998)	Nova Europa	1000	6	30	3,2	N/A
CdTe	(Kato et al. 2001)	Japão	1430	10,3	30	1,7	14
CdTe	(Fthenakis and Kim 2005)	Estados Unidos	1800	9	30	1,2	23,6
CdTe	(Alsema and Wild-Scholten 2005)	Sul da Europa	1700	9	30	1,1	25
CdTe	(Jungbluth et al. 2007)	Suíça	1117	7,1	20	2,5	N/A
CdTe	(Raugei, Bargigli, and Ulgiati 2007)	Sul da Europa	1700	9	30	1,5	48
CdTe	(Wild-Scholten 2009)	Sul da Europa	1700	10,9	N/A	0,84	16
CdTe	(V. Fthenakis et al. 2009)	Sul da Europa	1700	10,9	N/A	0,79	18
CdTe	(Masakazu I. et al. 2010)	China	1702	N/A	30	2,1	50
CdTe	(Held and Ilg 2011)	Europa	1450	10,9	30	0,9	24,5
CIS	(Jungbluth, et al. 2007)	Suíça	1117	10,7	20	2,9	N/A
CIS	(Raugei et al. 2007)	Sul da Europa	1700	11	30	2,8	95
CIS	(Ito et al. 2008)	China	2017	11	30	1,6	10,5
CIS	(Wild-Scholten 2009)	Sul da Europa	1700	10,5	30	1,45	21
CIS	(Masakazu I. et al. 2010)	China	1702	11	N/A	1,8	46

Fonte: Peng et al. (2013).

A radiação solar é a fonte disponível para a célula gerar energia e ela varia de acordo com a localização no globo terrestre. Ela refere-se à medida da energia emitida pelo sol que é recebida em unidade de área da superfície terrestre durante um tempo determinado (Michael Boxwell 2010). No estudo foi utilizada a radiação solar média do

local de estudo citado por Peng et al. (2013) e a radiação mínima, máxima e média dos países da América Latina (Tabela 2).

Tabela 2. – Radiação solar – Países da América Latina.

País	Mínimo (kWh/m ² /ano)	Média (kWh/m ² /ano)	Máximo (kWh/m ² /ano)
Argentina	1300	1800	2300
Bolívia	1800	2300	2800
Brasil	1500	2200	2600
Colômbia	1600	1950	2300
Costa Rica	1800	2000	2200
Cuba	1900	2100	2300
Chile	1200	2000	2800
Rep. Dominicana	2000	2200	2200
Equador	1500	1800	2100
El Salvador	2100	2250	2400
Guatemala	1700	2000	2300
Haiti	2100	2250	2400
Honduras	1900	2050	2200
Jamaica	1800	1950	2100
Ant. Holandesas	1900	2300	1900
Nicarágua	1700	1950	2200
Panamá	1600	1900	2200
Paraguai	1900	2000	2100
Peru	1500	2050	2600
Trinidad e Tobago	2100	2150	2200
Uruguai	1600	1800	1000
Venezuela	1800	2100	2400

Fonte:(© GeoModel Solar - SolarGIS, 2010).

O módulo de eficiência refere-se à eficiência do painel para converter a energia solar captada em energia elétrica. A vida útil do painel é o tempo de vida do painel, ou seja, o tempo em que este tem capacidade de absorção de energia. O coeficiente de rendimento indica o desempenho dos sistemas analisados, estando associado a todas as perdas geradas no conversor de energia, cabo e transformador. O PRE é a razão entre a energia investida durante o ciclo de vida do painel e a energia gerada durante a operação do sistema. Por fim, GEE são os gases de efeito estufa, que incluem SO₂, NO_x, CH₄, CO₂ entre outros, sendo este último o principal responsável pelo aquecimento global (V. M. Fthenakis and Moskowitz 2000).

Nos dados do inventário alguns autores expressam os resultados de emissões de GEE em gC (Ito et al. 2003; Kato et al. 2001) e outros em gCO₂ (Kato, Murata, and Sakuta 1998; Masakazu I., Komoto K., and Kurokawa K. 2010; Alsema 2000), enquanto os demais autores expressam em gCO₂-eq. Contudo, pode-se afirmar os GEE dos painéis PV são compostos por CO₂, pois, no caso do processo produtivo dos painéis PV, os demais gases não são relevantes, por serem significativamente menores, já que estão presentes apenas em algumas fases do ciclo de vida (Nieuwlaar and Alsema 1997), como no descarte. No presente estudo, essas etapas não são consideradas dentro dos limites da fronteira do sistema.

3 METODOLOGIA

A energia gerada ao longo do ciclo de vida (EG) por cada m² de painel PV instalado foi estimada de acordo com a equação (1) (Zamboti et al. 2013).

$$EG = \frac{RS \times ME \times \mathcal{U}}{100} \quad (1)$$

Onde, EG = energia gerada (kWh/m²)

RS = radiação solar anual (kWh/m²/ano)
 VU = vida útil (anos)
 ME = módulo de eficiência (%)

Para estimar a energia que, em média, cada painel pode gerar em cada um dos países da América Latina (EG_{AL}), apenas se substituiu o valor de RS pela radiação solar mínima, máxima e média anual desses países (RS_{AL}).

O período de recuperação da energia gasta no processo produtivo é estimado pela equação (2) (Peng, L. Lu, and H. Yang 2013).

$$PRE = \frac{ER_{FAB}}{EG_{AL}} \quad (2)$$

Onde, PRE = período de recuperação da energia (anos)
 ER_{FAB} = energia requerida na fabricação do painel (kWh/m²)
 EG_{AL} = energia gerada nas diferentes localizações analisadas (kWh/m²)

Estimou-se a quantidade de GEE da fabricação do painel (gCO₂/m²), ou seja, a quantidade de gramas de CO₂ por cada m² de painel PV produzido. Os quais foram estimados de acordo com os dados de GEE do ciclo de vida do painel obtidos da literatura (gCO₂/kWh) por meio da equação (3) (Peng, L. Lu, and H. Yang 2013).

$$GEE_{fabPV} = EG \times GEEP_V \quad (3)$$

Onde, GEE_{fab PV} = GEE emitidos na fabricação de cada m² de painel PV (gCO₂/m²)
 EG = energia gerada (kWh/m²)
 GEEP_V = gases de efeito estufa no ciclo de vida do painel (gCO₂/kWh)

Por fim, os GEE_{PV AL} dos painéis PV de acordo com a radiação solar da AL foram estimados de acordo a equação (4).

$$GEE_{PV AL} = \frac{GEE_{fabPV}}{EG_{PV AL}} \quad (4)$$

Onde, GEE_{PV AL} = gases de efeito estufa do painel PV por cada kWh de energia produzida de acordo com a radiação da AL (gCO₂/kWh)
 GEE_{fab PV} = GEE emitidos na fabricação de cada m² de painel PV (gCO₂/m²)
 EG_{PV AL} = energia gerada pelo painel PV na AL (kWh/m²)

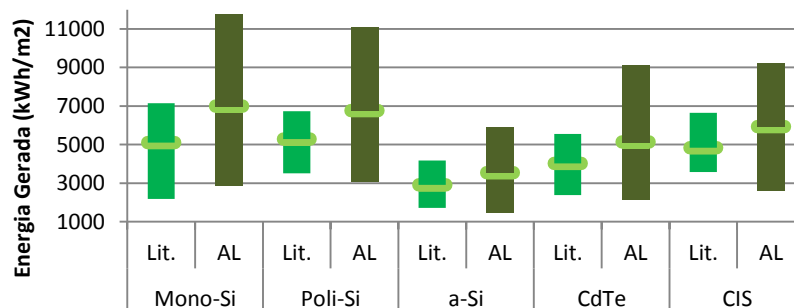
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Energia gerada e vida útil

A Figura 2 apresenta a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos no local inicial onde foram testados, dados obtidos da literatura (Lit.) (Peng, L. Lu, and H. Yang 2013), e a energia que estes gerariam se estivessem alocados na América Latina.

Os painéis na América Latina que apresentam melhor rendimento são os de Mono-Si. Ainda com a radiação mínima da AL, esses teriam rendimento maior do que nos países asiáticos e europeus, onde foram inicialmente testados.

Figura 2 - Energia gerada por painéis PV. Comparação entre os dados da literatura e o esperado segundo a radiação solar da América Latina.



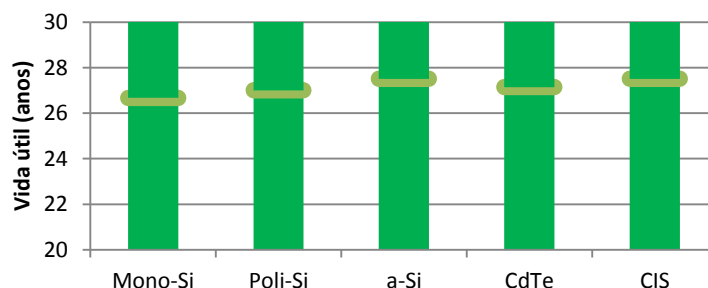
Fonte: Autor (2014).

Entretanto, nem todos os painéis a base de Silício apresentam um ótimo desempenho. Por exemplo, os painéis de a-Si expressam o menor rendimento dentre as cinco tecnologias, embora que estes sejam os painéis mais comercializados por apresentarem baixo custo na sua manufatura (Shah et al. 2006), principalmente quando o silício é reciclado (Peng. 2013). É importante ressaltar que os painéis PV, independente da tecnologia utilizada, mostram um bom rendimento nos locais na AL onde a radiação é alta. Os valores mínimos das faixas de energia gerada estão dados pelos lugares da AL onde a radiação solar é menor ou igual a 1200 kWh/m²/ano. Os valores máximos das faixas de energia gerada estão dados pelos locais da AL onde a radiação solar é maior a 2800 kWh/m²/ano.

A vida útil é uma das variáveis utilizadas na equação do cálculo de energia gerada. Esta variável foi levantada na literatura (Peng. 2013).

Com este estudo observa-se que a vida útil é um limitante da quantidade de energia gerada. A existência de uma estimativa confiável é condição para avaliação objetiva do desempenho destes produtos, seja do ponto de vista ambiental ou do ponto de vista econômico. Os dados encontrados na literatura assumem que a vida útil dos painéis varia entre 20 e 30 anos, resultando em uma média de 26,7 anos (Figura 3). Na verdade os estudos utilizam apenas três valores de vida útil: 20, 25 ou 30, com preferência para o último.

Figura 3 – A faixa de variação da vida útil dos painéis PV encontrada na literatura é constante para todas as tecnologias, oscilando entre um mínimo de 20 e um máximo de 30 anos.



Fonte: Autor (2014).

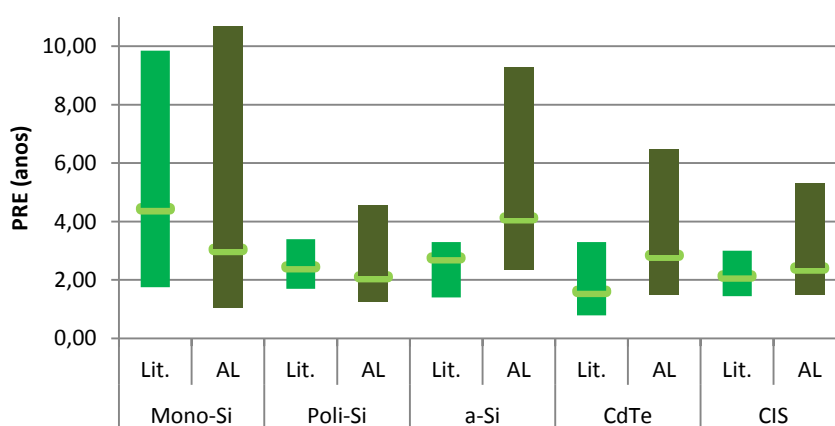
Cabe observar que as diferenças de composição dos produtos e do ambiente a que os materiais são expostos influenciam diretamente na degradação de um produto. Os autores assumem vida útil dentro de uma mesma faixa. Porém é possível que em alguns ambientes da América Latina a vida útil pode estar fora desta faixa – maior ou menor.

Nota-se que falta um estudo sistemático que forneça uma distribuição da vida útil esperada em função da tecnologia e das diferentes condições ambientais de uso.

4.2 Energia requerida e período de recuperação da energia

Com os dados do período de recuperação da energia tem-se o gráfico apresentado na Figura 4. Estes valores dependem diretamente da radiação solar do local de utilização, do módulo de eficiência e da energia requerida de fabricação. Pode-se verificar que os valores apresentam maior oscilação para os painéis PV a base de silício, enquanto que entre os *thin films* a oscilação do tempo de recuperação da energia é menor e não varia em termos gerais.

Figura 4 – Período de tempo de recuperação da energia de diferentes tecnologias. Comparação entre dados da literatura e o esperado nos países da América Latina.



Fonte: Autor (2014).

O tempo de vida útil que o material leva para recuperar a energia utilizada na produção é um indicador interessante do seu desempenho. Em todos os casos o tempo de recuperação da energia é menor que a mínima vida útil esperada. Para o caso do Mono-Si, em alguns cenários o produto gasta metade de sua vida útil para recuperar a energia embutida na sua fabricação. Para os demais produtos (poli-Si, A-Si, CdTE e CIS) o período de recuperação da energia representa entre menos de 10 a 15% da sua vida útil.

A maior variação do PRE se apresenta nos Mono-si, os quais em média demorariam até 4,4 anos para recuperar a energia gasta. Na AL os mesmos demorariam em média 3,0 anos por causa do aumento na geração de energia devido à radiação solar. Porém, os painéis que recuperariam a energia mais rapidamente seriam os Poli-Si, se estivessem alocados na AL. Os mesmos precisariam de apenas 2 anos, em média, para recuperar a energia. Com os valores do período de recuperação da energia foi possível estimar a energia requerida em cada um dos processos produtivos dos painéis PV, apresentados na Tabela 3.

Os resultados contrastam com a capacidade de geração de energia dos painéis PV. É preciso reconhecer que a grande variação entre o calculado neste trabalho e os dados da literatura, sobretudo nos painéis a base de silício, deve ser atribuída à eficiência e à fonte energética de cada um dos processos produtivos utilizados. Principalmente à etapa de extração da matéria prima, em especial para os painéis à base de Si. Vários autores relatam as limitações e incertezas no processo produtivo desses painéis (Peng, L. Lu, and H. Yang 2013; Dones and Frischknecht 1998).

Tabela 3 - Energia requerida na produção dos painéis (kWh/m²), dados obtidos da literatura.

	Mono-Si	Poli-Si	a-Si	CdTe	CIS
Mínimo	794,4	749,7	197,2	219,4	296,9
Média	1126,8	1090,1	375,0	360,1	382,4
Máximo	1459,2	1430,6	552,8	500,8	467,8

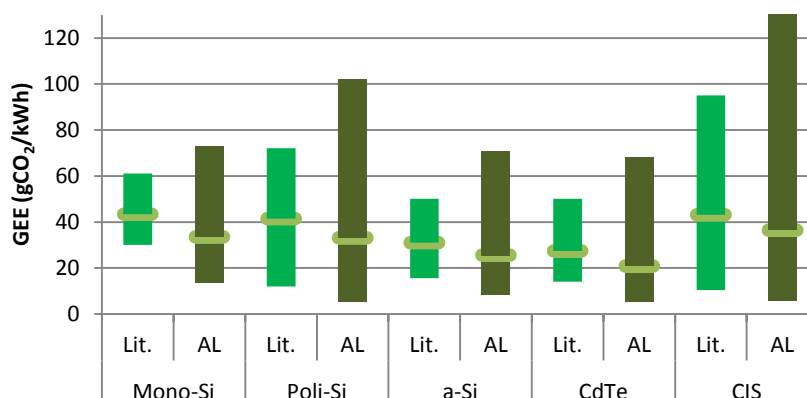
Fonte: Peng et al. (2013).

Ainda assim, pode-se afirmar que os *thin films* requerem uma menor quantidade de energia para a sua produção, enquanto que os painéis a base de Mono-Si podem consumir em média até 18.558,0 kWh/m².

4.3 Emissão de gases de efeito estufa no sistema fotovoltaico

A estimativa da taxa de GEE dos sistemas PV em regiões específicas é muito difícil, pelo fato de ser afetada por muitos parâmetros, tais como a energia requerida no ciclo de vida, a composição da matriz energética dos lugares de origem dos painéis PV, a radiação do local de alocação dos painéis, as condições climáticas durante a vida útil dos painéis (Peng, L. Lu, and H. Yang 2013). Ainda assim, atualmente a maioria das emissões de GEE durante o ciclo de vida dos painéis PV foi atribuída principalmente ao consumo de energia na produção dos componentes (Dones and Frischknecht 1998).

Figura 5 – Comparação das emissões de GEE de dados da literatura com os referentes à América Latina, em gCO₂/kWh de energia gerada.



Fonte: Autor (2014).

Na Figura 5 se verifica que a maior dispersão na taxa de emissões de GEE é dada nos painéis à base de CIS, sendo estes os que tendem a emitir maior quantidade de GEE, 134,58 gCO₂/kWh de energia gerada pelo painel PV.

Deve-se considerar que países como Brasil, Colômbia e Costa Rica apresentam valores de GEE por produção elétrica abaixo de 150 gCO₂/kWh de energia gerada (International Energy Agency 2012). Sendo assim, compensa fazer uma avaliação exaustiva sobre os lugares exatos onde os painéis serão alocados e a tecnologia que será utilizada. Dependendo da tecnologia utilizada nos painéis PV, estes podem ultrapassar as taxas de GEE atuais.

No sul de países como Argentina, Chile e uma parte do sul do Brasil, os índices de radiação solar são menores ou iguais a 1200 kWh/m²/ano. Isso resulta em uma radiação muito baixa, para compensar a energia embutida no processo produtivo dos painéis PV. Contudo, existem lugares na AL, como o norte do Chile, o nordeste brasileiro e a Argentina Central, que apresentam níveis de radiação elevados (>2300 kWh/m²/ano),

muito superior aos 2017kWh/m² registrados na Europa. Estes locais são aptos para a alocação dos painéis PV, gerando uma taxa mínima de GEE. Com a máxima radiação solar, a taxa de GEE diminui dentro do ciclo de vida dos painéis PV.

5 CONCLUSÕES

Em termos de geração de energia, pode-se determinar claramente que pelo fato da radiação solar ser maior em alguns lugares da AL, os painéis produziram 29,9% mais energia que nos países de origem. No entanto, é preciso ressaltar que a radiação solar na AL apresenta grandes variações, apesar de nem toda AL possuir as características necessárias para funcionamento eficiente dos painéis PV.

No que corresponde à vida útil dos painéis PV é importante fazer uma avaliação mais sistemática. Nas fases de uso dos painéis as emissões de GEE são insignificantes e o processo de descarte apenas existe em fase de teste, não sendo aplicado (Müller, Wambach, and Alsema 2006). Seria necessário para a avaliação da vida útil que os critérios de decisão para obtenção dessas faixas nos painéis PV fossem expostos, dado a variabilidade da tecnologia utilizada e as condições de uso, que dependem do contexto (clima, poluição, radiação, etc.).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelas bolsas de mestrado concedidas.

REFERÊNCIAS

- © GeoModel SolarSolarGIS. 2010. "Solar Radiation Maps: Direct Normal Irradiation (DNI)." <http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-DNI>.
- ABNT. 2009. *NBR 14040. ABNT/CB-38*.
- Alsema. 1998. "Energy Requirements of Thin Film Solar Cell Modules—a Review."
- Alsema, E. A. 2000. "Progress in Photovoltaics." *Energy Pay-Back Time and CO2 Emissions of PV Systems* 8 (1): 17–25. doi:10.1002/(SICI)1099-159X(200001/02)8:1<17.
- Alsema, E. A., M.J. Wild-Scholten, and VM Fthenakis. 2006. "Environmental Impacts of PV Electricity Generation - A Critical Comparison of Energy Supply Options."
- Alsema, and Wild-Scholten. 2005. "The Real Environmental Impacts of Crystalline Silicon PV Modules: An Analysis Based on up-to-Date Manufacture Data."
- Battisti, R, and R Corrado. 2005. "Evaluation of Technical Improvements of Photovoltaic Systems through Life Cycle Assessment Methodology."
- Dones, R., and R. Frischknecht. 1998. "Progress in Photovoltaics." *Life-Cycle Assessment of Photovoltaic Systems: Results of Swiss Studies on Energy Chains* 6 (2): 117 – 125. doi:10.1002/(SICI)1099-159X(199803/04)6:2<117.
- Fthenakis, V, HC Kim, M Held, M Raugei, and J Krones. 2009. "Update of PV Energy Payback Times and Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions."
- Fthenakis, V. M., and P. D. Moskowitz. 2000. "Progress in Photovoltaics: Research and Applications." *Photovoltaics: Environmental, Health and Safety Issues and Perspectives* 8 (February): 27 – 38. doi:10.1002/(SICI)1099-159X(200001/02)8:1.
- Fthenakis, Vasilis M., and Hyung-Chul Kim. 2005. "Energy Use and Greenhouse Gas Emissions in the Life Cycle of CdTe Photovoltaics." In . https://www.researchgate.net/publication/232016296_Energy_Use_and_Greenhouse_Gas_Emissions_in_the_Life_Cycle_of_CdTe_Photovoltaics.
- G.J.M. Phylipsen, and E.A. Alsema. 1995. *Environmental Life-Cycle Assessment of Multicrystalline Silicon Solar Cell Modules*. Study by Commission of NOVEM Report no. 95057. Utrecht, The Netherlands: Netherlands Agency for Energy and the Environment.
- Held, M, and R Ilg. 2011. "Update of Environmental Indicators and Energy Payback Time of CdTe PV Systems in Europe."
- International Energy Agency. 2012. "CO2 Emissions from Fuel Combustion - Highlights." <http://www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf>.
- Ito, M, K. Kato, H. Sugihara, T. Kichimi, J. Song, and K. Kurokava. 2003. "Solar Energy Materials & Solar Cells." *A Preliminary Study on Potential for Very Large-Scale Photovoltaic Power Generation (VLS-PV)*

- System in the Gobi Desert from Economic and Environmental Viewpoints* 75 (3-4): 507–17.
doi:10.1016/S0927-0248(02)00198-8.
- Ito, M, M Kudo, and K Kurokawa. 2008. “A PRELIMINARY LIFE CYCLE ANALYSIS OF A MEGA SOLAR SYSTEM.” In . <https://getinfo.de/app/A-PRELIMINARY-LIFE-CYCLE-ANALYSIS-OF-A-MEGA-SOLAR/id/BLCP%3ACN068988158>.
- Jungbluth, N, R Dones, and R Frischknecht. 2007. “Life Cycle Assessment of Photovoltaics; Update of the Ecoinvent Database.”
- Kato, K., T. Hibino, K. Komoto, S. Ihara, S. Yamamoto, and H. Fujihara. 2001. “Solar Energy Materials & Solar Cells.” *A Life-Cycle Analysis on Thin-Film CdS/CdTe PV Modules* 67: 279 – 287. doi:10.1016/S0927-0248(00)00293-2.
- Kato, K., A. Murata, and K. Sakuta. 1998. “Progress in Photovoltaics.” *Energy Pay-Back Time and Life-Cycle CO2 Emission of Residential PV Power System with Silicon PV Module*. 6 (2): 105 – 115.
doi:10.1002/(SICI)1099-159X(199803/04)6:23.O.CO;2-C.
- Krauter, S., and R. Ruthner. 2004. “Renewable Energy.” *Considerations for the Calculation of Greenhouse Gas Reduction by Photovoltaic Solar Energy* 29: 345–55. doi:10.1016/S0960-1481(03)00251-9.
- Lewis, G, and G Keoleian. 1997. “Life Cycle Design of Amorphous Silicon Photovoltaics Modules.”
- Masakazu I., Komoto K., and Kurokawa K. 2010. “Current Applied Physics.” *Life-Cycle Analyses of Very-Large Scale PV Systems Using Six Types of PV Modules* 10 (2): S271–73. doi:10.1016/j.cap.2009.11.028.
- Michael Boxwell. 2010. *Solar Electricity Handbook*. <http://solarelectricityhandbook.com/>.
- Müller, Anja, Karsten Wambach, and Erik Alsema. 2006. “Materials Research Society Symposium Proceedings.” *Life Cycle Analysis of Solar Module Recycling Process* 895.
- Nieuwlaar, E., and E. Alsema. 1997. *Environmental Aspects of PV Power Systems*.
<http://www.energycrisis.com/Apollo2/pvenv1997.pdf>.
- Nishimura, A., Y. Hayashia, K. Tanaka, M. Hirota, S. Kato, M. Ito, K. Arakic, and E.J. Hu. 2010. “Applied Energy.” *Life Cycle Assessment and Evaluation of Energy Payback Time on High-Concentration Photovoltaic Power Generation System* 87 (9): 2797 – 2807. doi:10.1016/j.apenergy.2009.08.011.
- P., Joshua. 2013. “Resources, Conservation and Recycling.” *Lyfe Cycle Analysis of Silane Recycling in Amorphous Silicon-Based Solar Photovoltaic Manufacturing* 70: 44 – 49. doi:10.1016/j.resconrec.2012.10.002.
- Pacca, S, D Sivaraman, and GA Keoleian. 2007. “Parameters Affecting the Life Cycle Performance of PV Technologies and Systems. Energy Policy.”
- Peng, J., L. Lu, and H. Yang. 2013. “Renewable and Sustainable Energy Reviews.” *Review on Life Cycle Assessment of Energy Payback and Greenhouse Gas Emission of Solar Photovoltaic Systems* 19: 255–74.
doi:10.1016/j.rser.2012.11.035.
- R. Rütther, and R. Zilles. 2011. “Energy Police.” *Making the Case for Grid-Connected Photovoltaics in Brazil* 39 (3): 1027–30. doi:10.1016/j.enpol.2010.12.021.
- Raugei, M, S Bargigli, and S Ulgiati. 2007. “Life Cycle Assessment and Energy Pay-Back Time of Advanced Photovoltaic Modules: CdTe and CIS Compared to Poly-Si.”
- Shah, A., J. Meier, A. Buechel, U. Kroll, J. Steinhäuser, F. Meillaud, H. Schade, and D. Dominé. 2006. “Thin Solid Films.” *Towards Very Low-Cost Mass Production of Thin-Film Silicon Photovoltaic (PV) Solar Modules on Glass* 502 (1-2): 292–99. doi:10.1016/j.tsf.2005.07.299.
- Sherwani, A.F., J.A. Usmani, and Varun. 2010. “Life Cycle Assessment of Solar PV Based Electricity Generation Systems: A Review”, 14 edition.
- Sueyoshi, T., and M. Goto. 2014. “Energy Economics.” *Photovoltaic Power Stations in Germany and the United States: A Comparative Study by Data Envelopment Analysis* 42 (March): 271 – 288.
- Varun, I.K. Bhat, and Ravi Prakash. 2009. “LCA of Renewable Energy for Electricity Generation systems—A Review”, 13 edition. Doi:10.1016/j.rser.2008.08.004.
- Wild-Scholten, M.J. 2009. “Energy Payback Time and Carbon Footprint of Commercial Photovoltaic Systems.”
- Wilson, R, and A Young. 1996. “The Embodied Energy Payback Period of Photovoltaic Installations Applied to Buildings in the UK. Building and Environment.”
- Zamboti, Marcio, Victor Hugo Ferreira, Bruno Henriques Dias, and Flávio Gomes. 2013. “Conceitos Iniciais Para Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Em Residências”. presented at the Introdução a engenharia, UFF e UFJF, July. http://www.ufjf.br/flavio_gomes/files/2013/05/Projeto-Solar-_Introdu%C3%A7%C3%A3o-a-Engenharia-EI%C3%A9trica.pdf.