

EFICIÊNCIA DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS NO CONTEXTO BRASILEIRO

André Freitas Oliveira – o.andre@ufabc.edu.br

Federico Bernardino Morante Trigo – federico.trigo@ufabc.edu.br

Fernando Gasi – fernando.gasi@ufabc.edu.br

Universidade Federal do ABC, Programa de Pós-Graduação em Energia

Resumo. A tecnologia solar fotovoltaica apresenta benefícios importantes para a mitigação dos efeitos adversos que a utilização de recursos não renováveis têm imposto sobre o meio ambiente, já que sua principal fonte de energia é limpa e renovável, o Sol. Contudo, alguns processos presentes em seu ciclo de vida requerem uma grande quantidade de energia para, por exemplo, a mineração e o processamento dos materiais presentes nos sistemas fotovoltaicos, não ausentando esta tecnologia de impactos ao meio ambiente. Uma das formas de avaliar este impacto se dá através da obtenção de um indicador que evidencie a eficiência energética relacionada a todo o ciclo de vida do sistema fotovoltaico, indicando o quanto de energia útil esta tecnologia pode fornecer à sociedade. Neste contexto, os indicadores Energy Returned on Invested (EROI) e Relação de Energia Útil (REU) foram utilizados para medir a eficiência energética do ciclo de vida do sistema fotovoltaico no contexto brasileiro. Foram utilizados dados de diversos países quanto à demanda energética para a manufatura de todo o sistema fotovoltaico (módulo, inversores, cabos etc), aplicados aos níveis máximo e mínimo de irradiação solar global encontrados no Brasil. Os resultados mostram que a tecnologia fotovoltaica apresentou bons resultados quando analisada pelo indicador EROI, demonstrando que a energia investida pela sociedade nos processos presentes em seu ciclo de vida é rapidamente recuperada. Contudo, a REU obteve um resultado relativamente baixo quando comparada com outros tipos de tecnologias de geração de energia elétrica, sejam elas renováveis ou não. A eficiência do módulo e o fator de capacidade do sistema foram identificados como os maiores responsáveis por este desempenho e, portanto, representam áreas com as maiores oportunidades de melhorias.

Palavras-chave: EROI, Ciclo de Vida Energético, Energia Solar

1. INTRODUÇÃO

Os efeitos adversos da exploração de fontes de energia que utilizam recursos não renováveis têm direcionado um número cada vez maior de cientistas na busca por fontes de energia de pouco impacto ambiental, social e econômico, e que ainda assim possibilitem a manutenção das atividades da sociedade humana. A tecnologia solar fotovoltaica apresenta bons indicativos para atender a esta demanda em um futuro próximo já que utiliza o Sol como fonte de energia e exibe algumas vantagens em relação às outras tecnologias de conversão de energia (Sampaio; González, 2017).

No entanto, e assim como todas as outras formas de conversão de energia, a tecnologia fotovoltaica não está isenta de impactos ao meio ambiente e estes devem ser levados em conta nos estudos sobre a sua implementação. Uma das formas de avaliação destes impactos se dá no âmbito energético, com o uso de indicadores que mensurem a eficiência energética do ciclo de vida relacionados à manufatura dos módulos e dos componentes auxiliares de um sistema fotovoltaico.

Um indicador bastante utilizado é o chamado Energy Returned on Invested (EROI), que mede o quanto de energia útil um sistema de geração de energia produz após a dedução de toda a energia investida pela sociedade para a construção deste sistema (Hall et al., 2014). Contudo, utilizado sozinho, o EROI não é um bom indicador da sustentabilidade a longo prazo de uma tecnologia de exploração de energia, dificultando a criação de políticas públicas de longo alcance (Raugei et al., 2012). Como forma de superar este problema, o indicador Relação de Energia Útil (REU) tem por objetivo avaliar a eficiência energética de todo o ciclo de vida de uma tecnologia, demonstrando a quantidade de energia que um sistema é capaz de transformar em energia útil (Herendeen, 2004), levando em conta todos os fluxos energéticos presentes no sistema, não apenas aqueles investidos pela sociedade.

Estudos sobre a série histórica do EROI mostram uma acentuada diminuição no valor deste indicador para os combustíveis fósseis, devido ao crescente gasto energético para a mineração e processamento deste tipo de combustível (Hall et al., 2014). Em contrapartida, o EROI de tecnologias renováveis tem crescido ao longo dos anos como resultado da melhora na eficiência energética e da redução da intensidade energética na produção deste tipo de tecnologia (Lambert et al., 2012). A Fig. 1 mostra a média de valores do EROI para diferentes combustíveis baseados em estudos de sistemas de geração de energia.

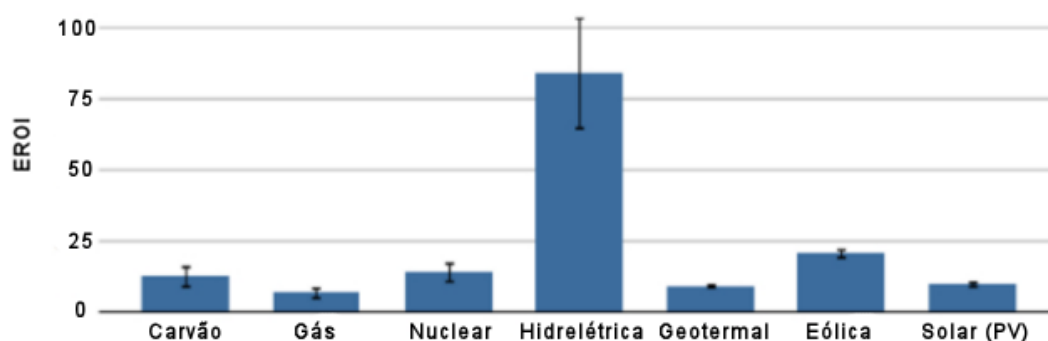


Fig. 1 – EROI de diferentes combustíveis. Adaptado de Hall et al. (2014).

Contudo, Hall et al. (2014) pede cautela ao analisar estes resultados pois os valores para o EROI de uma mesma tecnologia tendem a variar bastante dependendo do estudo em questão. Isto acontece devido não somente as diferentes suposições feitas em cada trabalho de pesquisa, mas também devido às diferentes fronteiras adotadas para cada situação, tornando difícil uma comparação direta entre os valores obtidos em cada estudo. A relação de energia útil tenta suprir esta adversidade ao fazer um cálculo considerando todo o ciclo de vida do sistema em estudo para a avaliação da sua eficiência energética, mas este indicador também está sujeito às mesmas diferenças metodológicas presentes nos estudos realizados com base no EROI.

De forma a garantir uma base metodológica de comparação da eficiência energética das tecnologias fotovoltaicas aqui estudadas (silício monocristalino e policristalino), apenas estudos contendo dados sobre todo o ciclo de vida destes sistemas foram considerados e aplicados no contexto brasileiro, possibilitando uma análise das condições de implementação desta tecnologia em diferentes regiões do Brasil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Revisão da literatura

Uma revisão da literatura especializada mostrou que poucos são os trabalhos que incluem os fluxos energéticos referentes a todas as etapas do ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos. A escolha de uma fronteira que abrange apenas os processos envolvidos na manufatura do módulo fotovoltaico foi o principal motivo identificado para o número reduzido de estudos que puderam ser utilizados. Os estágios do ciclo de vida de um sistema fotovoltaico incluem a mineração e processamento do material bruto, manufatura do módulo e sistema fotovoltaico, operação e descarte. Os trabalhos que não reportaram explicitamente os fluxos energéticos de todas estas etapas, tanto para o módulo, quanto para o resto do sistema (cabos, inversores, interruptores etc), foram excluídos da análise. As Tab. 1 e 2 contêm as informações mais relevantes do total de 7 artigos, abrangendo os anos de 2000 a 2013, que foram utilizados.

Tabela 1. Resumo das informações para os estudos de ciclo de vida de módulos monocristalinos

Referência	Localização	Eficiência do módulo (%)	Fator de qualidade	Tempo de vida (anos)	Irradiação (kWh/m ² /ano)	Demanda energética (MJ/m ²)
Alsema (2000)	Holanda (telhado)	14	0,75	30	1700	6900
	Holanda (central)	14	0,75	30	1700	7900
Junbluth (2005)	Suíça	15	0,75	30	1100	8065
Bizzari; Morini (2007)	Itália	14,1	0,8	25	1533	11153
Raugei et al. (2012)	Espanha	14	0,75	30	1700	3257

Tabela 1 – Continuação

Wild-Scholte (2013)	Europa	14,8	0,77	30	1700	3883,5
	China	14,8	0,77	30	1700	4659,5
Lundin (2013)	Suécia	14	0,75	30	1000	3257

Tabela 2. Resumo das informações para os estudos de ciclo de vida de módulos policristalinos

Referência	Localização	Eficiência do módulo (%)	Fator de qualidade	Tempo de vida (anos)	Irradiação (kWh/m ² /ano)	Demanda energética (MJ/m ²)
Alsema (2000)	Holanda (telhado)	13	0,75	30	1700	5400
	Holanda (central)	13	0,75	30	1700	6500
Junbluth (2005)	Suíça	13,2	0,8	30	1100	5910
Bizzari; Morini (2007)	Itália	12,5	0,8	25	1533	9101
Raugei et al. (2012)	Espanha	13	0,75	30	1700	3057
Weißbach et al. (2013)	Alemanha (telhado)	14,4	0,75	25	1000	2102
	Alemanha (central)	14,4	0,75	25	1000	2172
Wild-Scholte (2013)	Europa	14,1	0,77	30	1700	2225,5
	China	14,1	0,77	30	1700	2661,5
Lundin (2013)	Suécia	13,6	0,75	30	1000	3057

2.2 EROI e a eficiência energética do ciclo de vida

O indicador EROI foi introduzido como forma de possibilitar uma quantificação numérica dos benefícios que um usuário tem ao explorar uma fonte de energia (Raugei et al., 2012). Matematicamente a razão EROI, segundo Murphy et al. (2011), pode ser definida como,

$$EROI = \frac{\text{Energia entregue}}{\text{Energia necessária para entregar aquela energia}} \quad (1)$$

O numerador e o denominador são usualmente avaliados nas mesmas unidades, resultando em uma razão adimensional. Assim, se um processo em particular resulta em um EROI de 20:1, isto implica que foi necessário um investimento de 1 joule para obter 20 joule de energia útil (ou barril por barril, kWh por kWh etc). O EROI faz paralelo com práticas econômicas padrões, onde o custo de explorar um recurso é o custo da extração e inclui, como entrada de material e energia, apenas aqueles advindos do restante da economia (Herendeen, 2004), como mostrado na Fig. 2.

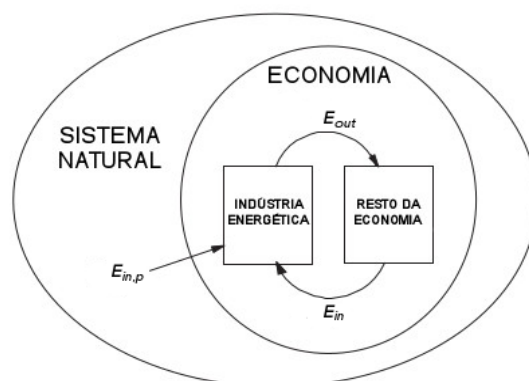


Fig. 2 – Fluxos energéticos para a análise de eficiência energética

Assim, o indicador EROI pode ser definido, simplesmente, como,

$$EROI = \frac{E_{OUT}}{E_{IN}}, \quad (1)$$

onde E_{OUT} é a energia útil entregue à sociedade e E_{IN} é a energia utilizada pela sociedade para obter aquela energia útil. No entanto, utilizado sozinho, o EROI não é um bom indicador da sustentabilidade a longo prazo de sistemas de exploração de energia, pois não considera todos os fluxos energéticos que são inseridos na fronteira de estudo, não podendo ser interpretado com uma medida da eficiência do ciclo de vida do objeto de estudo (Raugei et al, 2012). Assim, faz-se necessário uma formulação que atenda a uma questão mais global sobre a eficiência física com a qual um combustível possa ser convertido em energia útil. Define-se então a relação de energia útil (REU), expressa por,

$$REU = \frac{E_{OUT}}{E_{IN,p} + E_{IN}}, \quad (2)$$

onde $E_{IN,p}$ é a energia contida no combustível extraído diretamente da natureza. A REU, que nunca excede o valor 1, é útil para determinar o quanto de um dado estoque de energia pode ser utilizado pelo resto da sociedade (Herendeen, 2004).

2.3 Parâmetros do sistema fotovoltaico

Segundo Raugei et al. (2016), as análises energéticas dos sistemas fotovoltaicos devem fornecer algumas informações primordiais sobre as características da tecnologia adotada no estudo. São elas: o material das células (monocristalino, policristalino etc), o tipo de sistema (telhado, montado no chão), eficiência do módulo, tempo de vida do sistema, local de instalação e nível de irradiação. As informações relacionadas a estes parâmetros, adotadas neste estudo, são mostradas na Tab. 3.

Tabela 3 – Dados adotados para os cálculos de eficiência energética dos módulos fotovoltaicos para o caso brasileiro

Tipo de célula	Silício mono e policristalino
Tipo de sistema	Telhado
Eficiência do módulo (%)	15%
Fator de qualidade	0,75
Tempo de vida (anos)	30
Local de instalação	Brasil
Nível anual de irradiação solar global (kWh/m ² /ano)	1500 – 2500

A tecnologia fotovoltaica baseada em silício é dominante no mercado, representando mais de 90% do total utilizado (Fraunhofer, 2017) e, portanto, foi o objeto de estudo. As eficiências destes módulos podem chegar a valores de até 24,4% em laboratório para sistemas monocristalino e 19,9% para sistemas policristalino (Fraunhofer, 2017). Contudo, influências ambientais e as condições de uso resultam na degradação desta eficiência durante seu tempo de vida (Bhandari et al., 2015). Portanto, um valor médio de 15% de eficiência foi adotado para ambos os tipos de célula por ser recorrente na bibliografia estudada.

O tempo de vida reportado para os módulos varia entre 25 e 30 anos, com alguns estudos informando um valor de 15 anos para o tempo de vida útil dos componentes do sistema (Hou et al, 2016). Raugei (2016) sugere a adoção de 30 anos para o tempo de vida do módulo fotovoltaico.

Outro parâmetro importante para a determinação da quantidade de energia elétrica fornecida pela tecnologia fotovoltaica é o chamado fator de qualidade, que descreve a relação entre a energia efetivamente gerada pelo módulo e os valores obtidos teoricamente (Raugei, 2016). Ele estabelece o valor de energia que estará disponível para a rede após a dedução de todas as dissipações de energia (perdas térmicas, por condução etc) e da energia consumida para a operação. Quanto mais próximo de 1, mais eficiente o sistema e mais energia útil estará disponível. O valor de 0,75 foi aqui adotado por representar o valor base recomendado pela Agência Internacional de Energia (Raugei, 2016).

Os níveis de irradiação global média anual brasileira variam dependendo da localização e época do ano em que são medidos. Segundo Pereira e Lima (2017), estes níveis variam entre 1500 e 2500 kWh/m²/ano no Brasil, valores maiores do que a média da maioria dos países europeus onde a tecnologia fotovoltaica é mais difundida. Os dois valores foram considerados na realização dos cálculos, como forma de analisar as variações nos valores das eficiências energéticas em cada condição de irradiação, analisando a viabilidade do sistema fotovoltaico em diferentes localizações.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apesar de ser um país com excelentes condições para a implementação da tecnologia fotovoltaica em larga escala, devido aos altos níveis de irradiação solar e das grandes reservas de quartzo de boa qualidade (Junior et al., 2017), a produção de energia elétrica nacional via módulo fotovoltaico representa apenas 0,01% do total (EPE, 2017). Isto se reflete na inexistência da cadeia de processos necessários para a manufatura dos componentes do sistema fotovoltaico em território nacional, resultando na não disponibilidade de dados que representem a situação brasileira. Devido a isto, informações de estudos realizados em outros países foram utilizados como referência para o cálculo dos indicadores energéticos para o cenário brasileiro.

Após a obtenção dos dados, o cálculo dos indicadores é trivial, sendo exemplificada nas Eq. 3 e 4,

$$EROI = \frac{2500 \times 3,6 \times 30 \times 0,75 \times 0,15}{3057} = 9,93 \quad (3)$$

$$REU = \frac{2500 \times 3,6 \times 30 \times 0,75 \times 0,15}{3057 + (2500 \times 3,6 \times 30)} = 0,11 \quad (4)$$

onde 2500 kWh/m²/ano é a irradiação solar global, 3,6 MJ/kWh é um fator de conversão, 30 anos é o tempo de vida do módulo, 0,75 é o fator de qualidade do sistema fotovoltaico, 0,15 é a eficiência do módulo e 3057 MJ é a demanda energética por metro quadrado de módulo. O segundo termo da soma no denominador da Eq. 4 reflete o total de energia que seria irradiada por metro quadrado, em MJ, durante o período de 30 anos em uma localização com irradiação solar global da ordem de 2500 kWh/m²/ano. Ele representa a energia fornecida ao módulo durante o seu tempo de vida, ou seja, a energia total em forma de radiação solar disponível para conversão em eletricidade.

De modo geral, a tecnologia fotovoltaica apresentou bons resultados quando analisados pelo indicador EROI. A Fig. 3 e 4 mostram a evolução temporal deste indicador para os módulos de silício policristalino nas condições de máxima e mínima irradiação solar encontradas no Brasil. Tais valores estão em acordo com os encontrados na literatura (Bhandaria et al., 2015).

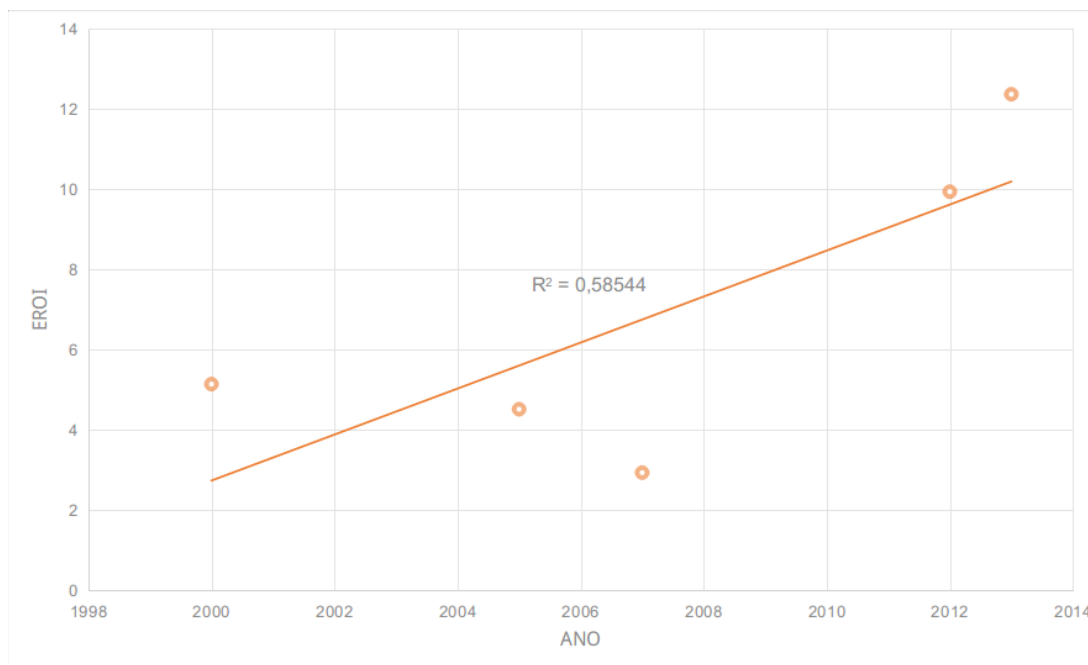


Fig. 3 – Evolução do EROI para módulos de silício policristalino em condições de máxima irradiação solar (2500 kWh/m²/ano)

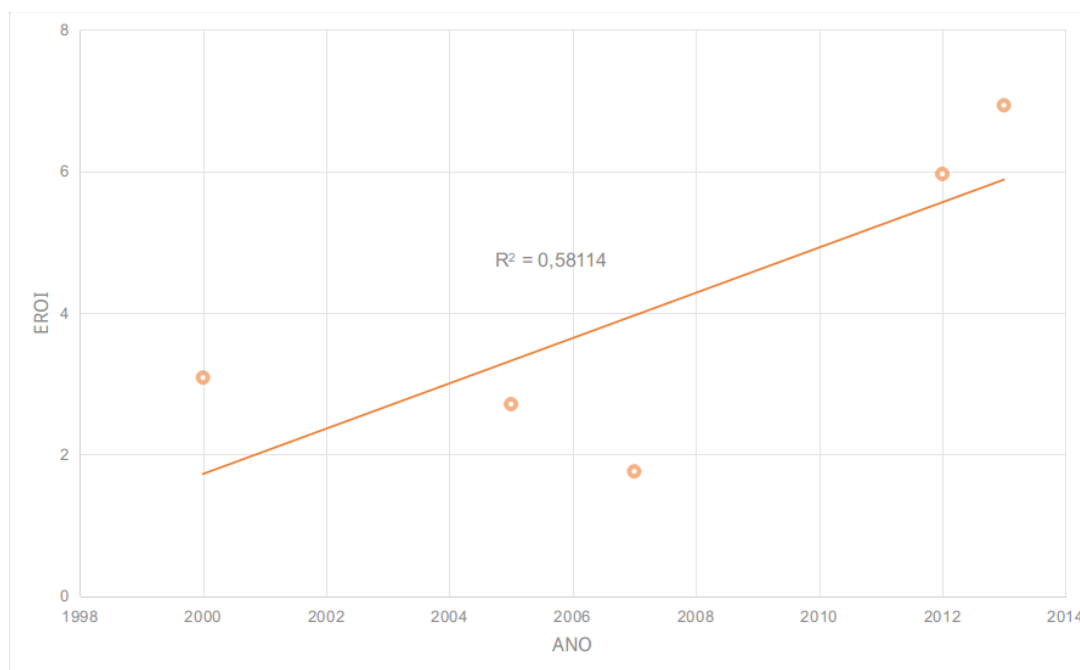


Fig. 4 – Evolução do EROI para módulos de silício policristalino em condições de mínima irradiação solar (1500 kWh/m²/ano)

O EROI médio para as condições de máxima e mínima irradiação solar dos módulos policristalinos foi de, respectivamente, 6,43 e 4,03. Ou seja, as regiões do Brasil com melhores condições de irradiação resultam em um aumento de aproximadamente 60% na energia obtida com o uso do módulo fotovoltaico. As Fig. 5 e 6 mostram os resultados obtidos para os módulos monocristalinos.

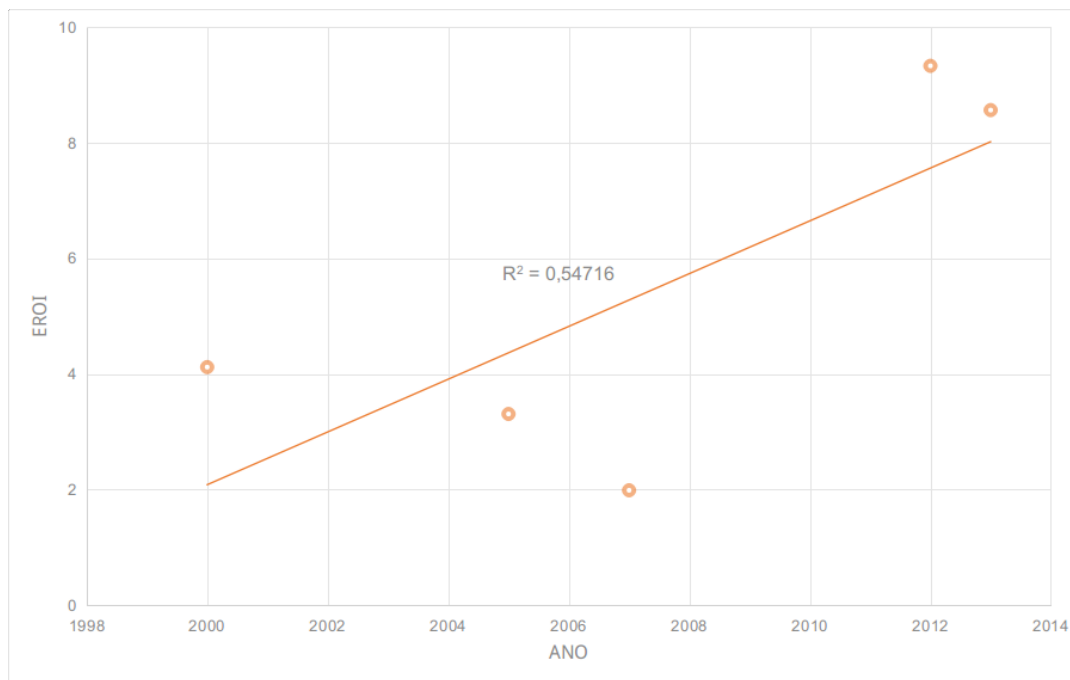


Fig. 5 – Evolução do EROI para módulos de silício monocristalino em condições de máxima irradiação solar (2500 kWh/m²/ano)

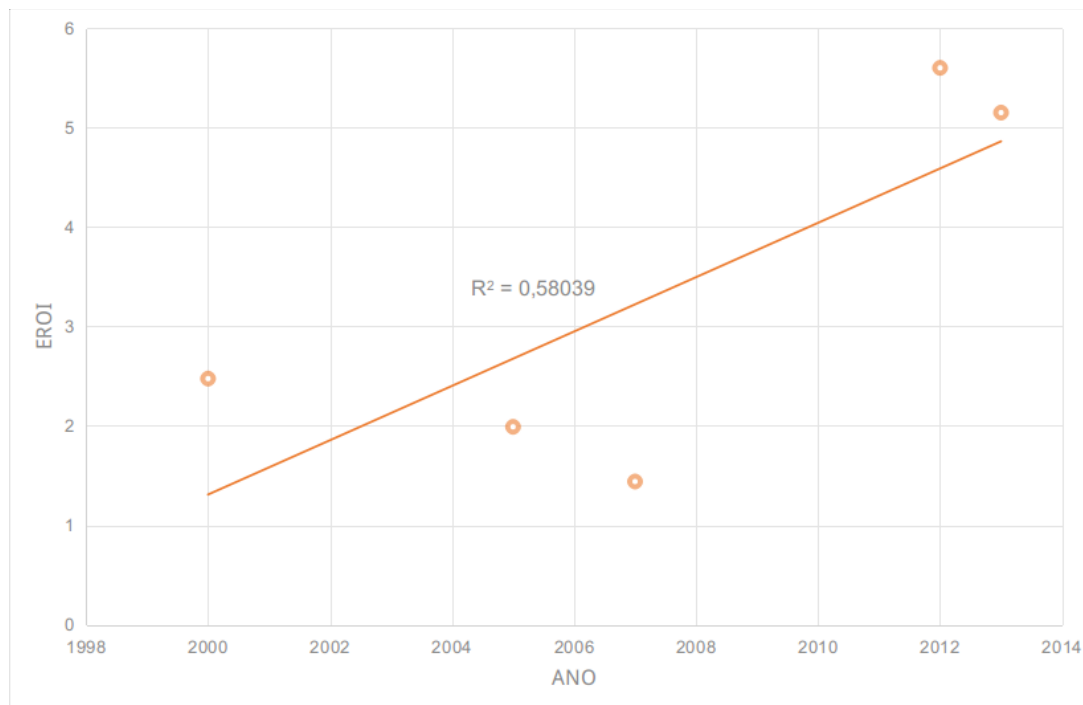


Fig. 6 – Evolução do EROI para módulos de silício monocristalino em condições de mínima irradiação solar (1500 kWh/m²/ano)

Fica evidente que uma regressão linear não explica satisfatoriamente a evolução do indicador EROI para os casos aqui considerados. Isto se deve, majoritariamente, pela abrangência geográfica dos dados que foram utilizados para a obtenção destes resultados. Informações criteriosas sobre a demanda energética para a obtenção dos módulos seriam necessárias para um resultado mais significativo. No entanto, tais dados não foram observados na literatura consultada para o caso brasileiro.

Os módulos de silício monocristalino apresentaram um EROI médio menor em comparação aos módulos policristalinos devido ao maior gasto energético na sua construção, com valores de 4,44 para condições de máxima irradiação e 2,27 para condições de mínima irradiação, uma diferença de aproximadamente 66%.

Já a relação de energia útil mostrou valores relativamente constantes, em torno de 0,11, para todas as condições estudadas. Isto significa que a eficiência energética do ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica nas condições de irradiação solar brasileira é de aproximadamente 11%, isto em um cenário onde se considera que a energia necessária para a construção do sistema fotovoltaico no Brasil seria a mesma do que a utilizada em países europeus.

Cálculos subsequentes mostraram que o aumento da eficiência dos módulos tem um maior impacto na REU do que a diminuição da demanda energética dos processos envolvidos na construção do sistema fotovoltaico. Mantendo-se um valor fixo para os demais parâmetros e alterando a eficiência do módulo, observou-se um aumento linear no valor da REU, como mostra a Fig. 7. No entanto, os valores da REU obtidos são relativamente baixos quando comparados à tecnologias de geração de energia elétrica com a utilização de combustíveis fósseis. Utilizando dados do contexto alemão, disponibilizados por Weißbach et al. (2013), Rauei (2013) calculou um valor de REU de 0,4 para a geração de eletricidade considerando o ciclo de vida do carvão, ou seja, uma eficiência energética do ciclo de vida de 40%.

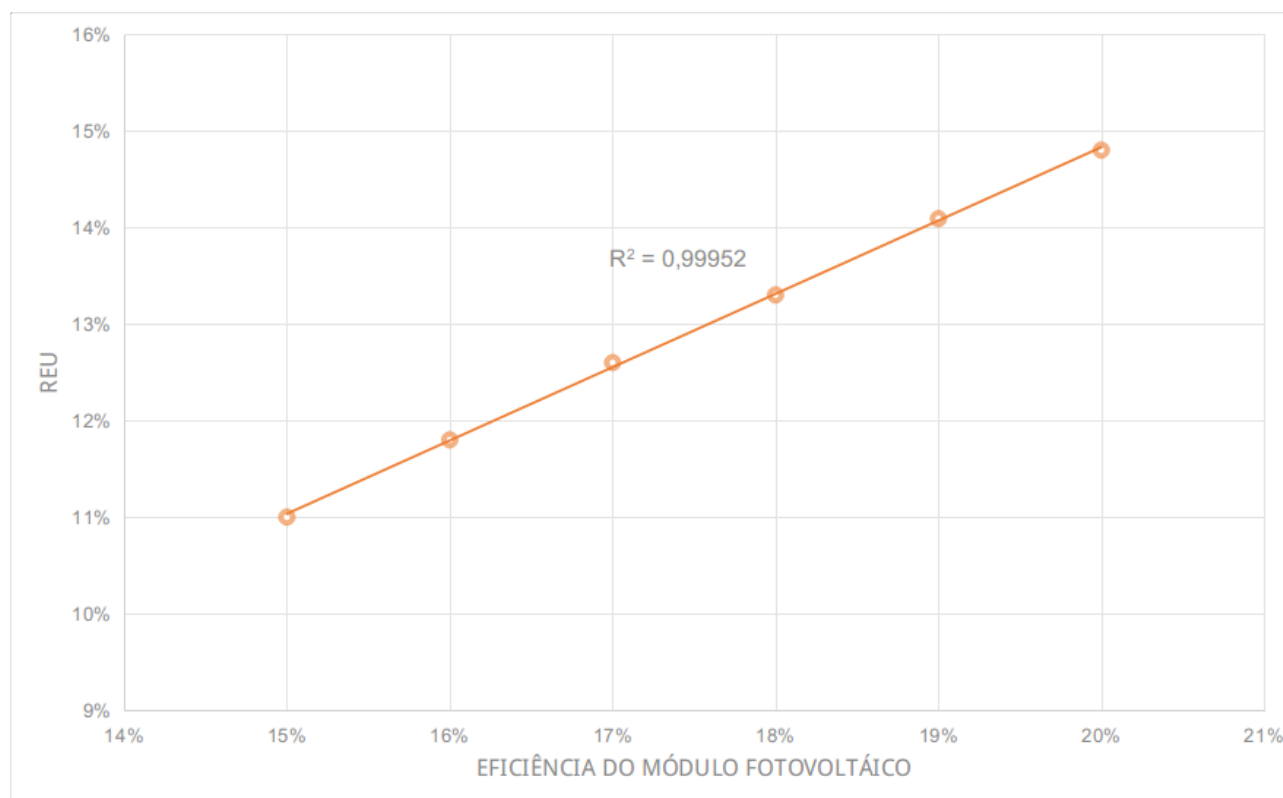


Fig. 7 – Relação de energia útil para diferentes valores de eficiência do módulo fotovoltaico

Contudo, deve-se levar em conta que estes resultados analisam apenas as questões de custo energético na avaliação do ciclo de vida destas tecnologias. O grau de sustentabilidade de uma tecnologia de transformação de energia deve levar em conta aspectos econômicos, sociais e ambientais, de forma a permitir uma avaliação sistêmica de todos os processos que envolvem o seu uso. Neste caso, apesar de fazer uso de processos de grande intensidade energética nos primeiros estágios do seu ciclo de vida, a tecnologia fotovoltaica apresenta vantagens em relação a opções que se utilizam de combustíveis não renováveis como, baixa necessidade de manutenção, pouco impacto ambiental, possibilidade de geração próxima ao consumidor, utilizar uma fonte limpa e renovável, potencial mitigador das emissões de gases do efeito estufa etc (Sampaio; Gonzáles, 2017).

4. CONCLUSÃO

De acordo com Hall et al. (2009), uma tecnologia de conversão de energia precisa ter um EROI mínimo, estimado em 3, para que esta tecnologia consiga atender as demandas energéticas mais básicas da sociedade. Ambas as tecnologias consideradas neste estudo atendem a este requisito quando utilizadas em condições de máxima irradiação solar (2500 kWh/m²/ano). Já nas condições de mínima irradiação solar, encontrados na região sul do Brasil, os módulos

monocristalinos apresentaram resultados insatisfatórios, obtendo um EROI médio de apenas 2,27.

Contudo, ao considerar apenas os estudos mais recentes, a tecnologia solar fotovoltaica apresenta bons indicativos de evolução na sua eficiência. A Tab. 4 apresenta o valor médio encontrado para o EROI de ambas tecnologias, nas duas condições de irradiação consideradas, com base em dados mais recentes.

Tabela 4 – Valores de EROI médios para as duas tecnologias estudadas com dados atualizados

Tecnologia	EROI_{MAX}	EROI_{MIN}
Monocristalino	8,5	5,15
Policristalino	12,4	6,93

Os resultados expostos na Tab. 4 mostram a importância da utilização de dados atualizados sobre as tecnologias fotovoltaicas disponíveis no mercado, já que o avanço no corpo de conhecimento sobre este energético tem, não somente aumentado a eficiência dos módulos fotovoltaicos, mas também diminuído a energia necessária para a manufatura de todos os componentes do sistema fotovoltaico. Isto se refletiu positivamente no indicador EROI, que obteve resultados satisfatórios e até mesmo maiores do que os encontrados na literatura, como reflexo das boas condições de irradiação solar presentes em grande parte do território brasileiro.

Todavia deve-se enfatizar que os dados utilizados para estes cálculos foram obtidos considerando uma demanda energética para manufatura do sistema fotovoltaico que provavelmente não se aplicaria na prática. Como mencionado anteriormente, o Brasil não detém toda a cadeia de processos necessários para a produção dos módulos fotovoltaicos, que se inicia na extração e processamento das matérias-primas e se encerra na construção e montagem de todo o sistema. Esta demanda energética seria presumivelmente maior para o caso brasileiro devido a ineficiência energética da indústria nacional perante àquela presente em países desenvolvidos e que produzem módulos fotovoltaicos.

A relação de energia útil se manteve praticamente constante, por volta de 11%, para todos os casos estudados. Este resultado é relativamente baixo e reflete a baixa densidade energética da radiação solar. Como consequência, o aumento da eficiência do módulo e do fator de qualidade do sistema fotovoltaico, possibilitando uma maior geração de energia elétrica, tiveram maior impacto positivo na energia útil gerada do que a redução na demanda energética para a construção do sistema.

Por fim, a tecnologia fotovoltaica apresenta indicativos da sua importância para uma futura transição de matriz energética em direção a uma que seja renovável e cause uma menor quantidade de impactos ao meio ambiente. Ainda existem grandes desafios a serem vencidos, relacionados à características inerentes a esta forma de conversão de energia (intermitência) e as dificuldades de armazenamento da energia produzida para utilização em grande escala. Apesar disto, estudos relacionados ao seu potencial de geração de energia têm mostrado resultados satisfatórios, evidenciando a sua capacidade para atender, em certos casos, a demanda energética mínima da sociedade humana.

REFERÊNCIAS

- Alsema, E. A., 2000. Energy Payback Time and CO₂ emissions of PV Systems, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 8, pp 17-25.
- Bhandaria, K. P., Collier, J. M., Ellingson, R. J., Apul, D. S., 2015. Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, pp. 133-141.
- Bizzari G., Morini J. L., 2007. Life Cycle Analysis of Roof Integrated Photovoltaic Systems, *International Journal of Environmental Technology*, vol. 7, pp 134-146.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional. 296p. Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro, 2017;
- Hall, C. A. S., Lambert, J. G., Balogh, S. B., 2014. EROI of different fuels and the implications for society, *Energy Policy*, vol. 64, pp 141-152.
- Hou, G., Sun, H., Jiang, Z., Pan, Z., Wang, Y., Zhang, X., Zhao, Y., Yao, Q., 2016 . Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China, *Applied Energy*, vol. 164, pp 882-890.
- Jungbluth, N., 2005. Life Cycle Assessment of Crystalline Photovoltaics in the Swiss Ecoinvent Database, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 119, pp 296-305.
- Junior, H. F., Trigoso, F. B. M., Cavalcanti, J. A. M., 2017. Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: Challenges and prospects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, pp 469-475.

- Lambert, J., Hall, C. H., Balogh, S., Poisson, A., Gupta, A., 2012. EROI of Global Energy Resources – Preliminary Status and trends, DFID – 59717, Report 1, State University of New York, College of Environmental Science and Forestry.
- Lundin, J., 2013. EROI of Crystalline Silicon Photovoltaics: Variations Under Different Assumptions Regarding Manufacturing Energy Inputs and Energy Outputs, Uppsala University.
- Pereira, E. B., Lima, J. H. G., 2008. Solar and wind energy resource assessment in Brazil. National Institute for Space Research – INPE, São José do Campos.
- Pinto, J. T. M., Amaral, K. J., Janissek, P. R., 2016. Deployment of photovoltaics in Brazil: Scenarios, perspectives and policies for low-income housing, *Solar Energy*, vol. 133, pp 73-84.
- Raugei, M., Palmer, P. F., Fthenakis, V., 2012. The Energy Return on Energy Investment (EROI) of photovoltaics: Methodology and Comparisons with Fossil Fuel Life Cycles, *Energy Policy*, vol. 45, pp 576-582.
- Raugei, M., 2013. Comments on “Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants”—Making clear of quite some confusion, *Energy*, vol. 59, pp 781-782.
- Sampaio, P. G. V., Gonzáles, M. O. A., 2017. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp 590-601.
- Weißbach, D., Ruprecht, G., Huke, A., Czerski, K., Gottlieb, S., Hussein, A., 2013. Energy Intensities, EROIs (Energy Returned on Invested) and Energy Payback Times of Electricity Generating Power Plants, *Energy*, vol. 52, pp 210-221.
- Wild-Scholten, M. J., 2013. Energy Payback Time and Carbon Footprint of Commercial Photovoltaic Systems, *Solar Energy Mater Solar Cells*, vol. 119, pp 296-305.

EROI AND LIFE CYCLE ENERGY EFFICIENCY OF PV MODULES IN THE BRAZILIAN CONTEXT

Abstract. *The solar PV technology has crucial benefits to mitigate the adverse effects that non-renewable resources exploitation impose to the environment, for example, being a clean and renewable energy source, and having no need for fuel extraction. However, some process in its life cycle require a large amount of energy, for mining and processing the material necessary in a PV system for example, thus not making this technology free from harming the environment. One way to evaluate the degree of this impact is by calculating an index that shows the energy efficiency related to the life cycle of the PV system, indicating how much useful energy this technology can return to society. In this scenario, the Energy Returned on Invested (EROI) and the Net Energy Ratio (NER) indexes were used to evaluate the energy efficiency of the life cycle of PV systems, taking into account the Brazilian solar irradiation levels. Data of the energy required for the manufacturing of all PV systems components (module, inverters, cables etc) were taken from different studies and applied to the maximum and minimum levels of global solar irradiation found in Brazil. The results show that the solar PV technology presented good results when analyzed by EROI, making it clear that the energy invested by society in the whole chain of a PV system manufacturing processes is quickly recovered. However the NER results were not as high, specially when compared with other energy converting technologies, renewable or not. The module efficiency and the capacity factor were identified as the main reason for this performance, thus representing the areas with greater opportunity for improvement.*

Key words: *EROI, Life Cycle Energy Analysis, Solar Energy*