

## Eficiência Energética de Módulos Fotovoltaicos Durante Ciclo de Vida em Campina Grande/PB

M. D. Lucena<sup>1</sup>, M. C. S. Simões<sup>2</sup>, B. A. Luciano<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Doutorando em Engenharia Elétrica, PPgEE/CEEI/UFCCG

<sup>2</sup>Mestrando em Engenharia Elétrica, PPgEE/CEEI/UFCCG

<sup>3</sup>Professor, Departamento de Engenharia Elétrica, PPgEE/CEEI/UFCCG

\*(e-mail: benedito@dee.ufcg.edu.br)

**Abstract:** The increasing costs of using fossil fuel, combined with the environmental issue, culminated in the search for new energy sources. The answer found for the expansion of power generation and the diversity of its matrix was the use of energy from renewable sources, such as photovoltaic solar energy. However, like the other forms of energy conversion, photovoltaic technology is not free from environmental impacts and this must be taken into account in studies of its implementation. One of the ways of evaluating these impacts is in the energy field, using indicators that measure the energy efficiency of the life cycle related to the manufacture of the entire photovoltaic system (modules, inverters, and auxiliary components), indicating the amount of energy useful this technology can provide to society. In this context, this study aims to evaluate the impacts from a photovoltaic system in Campina Grande / PB, throughout their life cycle, by the indicators Energy Returned on Invested and Schedule Useful Energy, evidencing and measuring the energy efficiency of the life cycle, compared to photovoltaic systems installed in many countries.

**Resumo:** Os custos cada vez mais elevados na utilização da energia de origem fóssil, combinado à questão ambiental, culminou na busca por novas fontes de energia. A resposta encontrada para a expansão da oferta de energia e da diversidade da matriz energética foi a utilização de energia provinda de fontes renováveis, como por exemplo, energia solar fotovoltaica. No entanto, assim como todas as outras formas de conversão de energia, a tecnologia fotovoltaica não está isenta de impactos, sejam eles: ambientais, econômicos ou sociais; e estes devem ser levados em conta nos estudos sobre a sua implementação. Uma das formas de avaliar estes impactos se dá com o uso de indicadores que mensurem a eficiência energética do ciclo de vida relacionados à manufatura de todo o sistema fotovoltaico (módulos, inversores, e componentes auxiliares), indicando o quanto de energia útil esta tecnologia pode fornecer à sociedade. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar os impactos provenientes de um sistema fotovoltaico em Campina Grande/ PB, durante todo o seu ciclo de vida, mediante os indicadores Energy Returned on Invested e Relação de Energia Útil, evidenciando e medindo a eficiência energética do ciclo de vida, comparado a sistemas fotovoltaicos instalados em diversos países.

**Keywords:** energy efficiency, life cycle, photovoltaic solar energy.

**Palavras-chaves:** ciclo de vida; eficiência energética; energia solar fotovoltaica.

### 1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade da matriz energética representa um dos temas mais inquietantes, haja vista o crescimento do consumo energético e o esgotamento iminente das fontes de energia não renováveis. Na prática, a sustentabilidade energética corresponde a todas as ações que visem o uso eficiente da energia, sem comprometer a demanda e preservando-a para as gerações futuras (Melo, 2018). Dentre os vários meios para alcançar esse intento, o uso da tecnologia solar fotovoltaica é, sem dúvida, um dos que tem obtido mais atenção.

O uso da tecnologia solar fotovoltaica oferece benefícios que não são promovidos por outras tecnologias de energia renovável, seja pela longa vida útil do seu sistema ou pelo baixo custo de manutenção. Além das vantagens provenientes do uso dessa tecnologia, os investimentos para sua instalação e operação tem sofrido reduções substanciais nas últimas décadas. A

análise do preço de 47 sistemas solar fotovoltaicos isolados de 100 a 6600 W, de 1987 a 2004, indicou que esses sistemas apresentam uma tendência de redução de preços de aproximadamente 1 US\$/W ao ano (Bhandari, 2015).

Globalmente, a eletricidade convertida a partir da energia solar fotovoltaica (ESFV) atingiu em 2016 em torno de 300 GW, equivalente a 310 TWh, 26% a mais que em 2015 e representando pouco mais de 1% da produção global de energia (OECD, 2018). No Brasil, apesar de seu uso ainda ser incipiente, o Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2026, estima que a capacidade instalada de conversão solar chegará a 13 GW em 2026, sendo 9,6 GW de conversão centralizada e 3,4 GW de conversão distribuída.

Assim, à medida que o mercado fotovoltaico cresce, torna-se cada vez mais importante compreender o desempenho energético das tecnologias fotovoltaicas, bem como, investigar todos

os processos envolvidos durante a vida útil do módulo fotovoltaico. Uma das formas de avaliar esses processos se dá pela utilização dos indicadores Relação de Energia Útil (REU) e o retorno da energia investida (EROI) que são duas das métricas mais comuns utilizadas para representar o desempenho energético das tecnologias.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar os indicadores REU e EROI, considerando dados de um sistema solar fotovoltaico que será instalado no Laboratório de Sistemas de Potência (LSP), situado no Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG, em Campina Grande/PB. Essa avaliação terá seus resultados comparados a estudos encontrados na literatura, possibilitando uma análise das condições de implementação desta tecnologia nesta região.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O uso de recursos fósseis para obtenção de energia é reconhecidamente danoso ao meio ambiente. O aquecimento global é a principal consequência da elevada emissão de gases para a atmosfera, oriundo da queima de combustíveis fósseis. Na busca de uma forma de energia alternativa, há a preocupação não só econômica como também sustentável.

A fim de minimizar a degradação do meio ambiente durante o processo de conversão energética e principalmente devido às emissões de gases poluentes na atmosfera terrestre, a utilização de fontes de energias renováveis se apresenta como o uso correto dos recursos naturais, classificando-se como energia eficiente e sustentável (Carvalho, 2012).

Desta forma, um aumento acentuado na utilização de energia solar, naturalmente disponível, tem sido observado, devido à crescente demanda de energia eficiente.

### 2.1 Energia Solar Fotovoltaica

Dentre os vários tipos de fontes renováveis, o emprego da energia solar é sem dúvida, um dos mais importantes e tem ocupado papel de destaque. O termo energia solar é um termo genérico que se refere à energia proveniente da luz e do calor do sol. Essa energia pode ser convertida em energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes, e em energia elétrica, por meio de diversas tecnologias (Carvalho, 2012). Para a obtenção de energia elétrica a partir da energia solar existem dois sistemas:

- i. heliotérmico: a irradiação solar é convertida inicialmente, em energia térmica e posteriormente, em energia elétrica;
- ii. fotovoltaico: a conversão de energia solar em energia elétrica se deve ao efeito fotovoltaico, no qual os fótons contidos na luz solar são convertidos diretamente em energia elétrica por meio de células fotovoltaicas (Dzimano, 2008).

Os altos custos para implantação estão em processo de redução, o que é atribuído aos ganhos de escala, às inovações tecnológicas e à sobre oferta. Além disso, a taxa média de crescimento da conversão solar no mundo entre os anos de 2008 e 2013 foi superior a 65% ao ano (ANEEL, 2014).

A grande disponibilidade de recurso energético solar pela posição geográfica favorável, incentivo governamental e a

redução dos custos para implementação de sistemas solar fotovoltaico, tem favorecido a exploração da ESFV no Brasil.

Entretanto, assim como todas as formas de conversão de energia, a tecnologia fotovoltaica não está isenta de impactos ao meio ambiente, o que pode ser evidenciado na extração do silício para produção de células fotovoltaicas, fabricação dos demais componentes, transporte dos mesmos até o local da instalação e outros, os quais devem ser levados em consideração nos estudos sobre a sua implementação.

Dentre as diversas formas de avaliação destes impactos, o âmbito energético ocupa posição de destaque, sobre o qual o uso de indicadores que mensuram a eficiência energética do ciclo de vida relacionados à manufatura dos módulos e dos componentes auxiliares de um sistema fotovoltaico é avaliado.

### 2.2 Indicador EROI

Foi introduzido para fornecer uma quantificação numérica do benefício que o usuário obtém da exploração de uma fonte de energia, em termos de “quanta energia é obtida de um processo de conversão energética comparado a quanto dessa energia é necessária para extração de uma unidade da energia em questão” (Murphy, 2010). Ou seja, é um método que calcula o retorno de energia à economia e sociedade, comparado à energia utilizada para obter esta energia, pela relação entre a saída e a entrada de energia de um mesmo processo.

O cálculo do EROI de um sistema exige uma definição clara de quais insumos energéticos ao longo de todo o seu ciclo de vida devem ser classificados como “investimentos”. Essa classificação é determinada pela escolha do espaço do sistema e limites de tempo e, se os resultados devem ser comparados àqueles para sistemas diferentes, torna-se absolutamente essencial que o procedimento de cálculo seja aplicado consistentemente (Raugei, 2012).

Matematicamente, a razão EROI pode ser definida como:

$$EROI = \frac{\text{Energia entregue}}{\text{Ener. necessária p/ entregar a energia}} \quad (1)$$

Se um processo em particular resulta em um EROI de 20:1, isto implica que foi necessário um investimento de 1 J para obter 20 J de energia útil (ou barril por barril, kWh por kWh etc.). O EROI também faz um paralelo com práticas econômicas padrões, no qual o custo de explorar um recurso é o custo da extração e inclui apenas aqueles advindos do restante da economia, como apresentado na Figura 1.

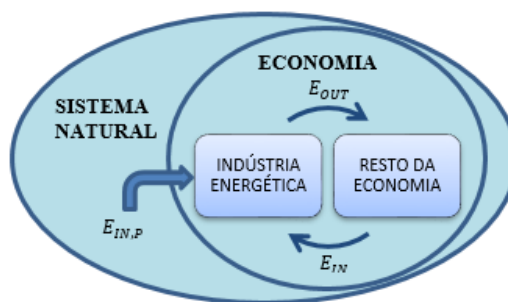


Fig. 1 Fluxos energéticos para a análise de eficiência energética (Adaptada de Herendeen, 2004).

Assim, o EROI pode ser definido como:

$$EROI = \frac{E_{OUT}}{E_{IN}} \quad (2)$$

onde  $E_{OUT}$  é a energia útil entregue à sociedade e  $E_{IN}$  é a energia utilizada pela sociedade para obter aquela energia útil.

Contudo, quando empregado 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 (Hall, 2014).

### 2.3 Indicador REU

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.

Define-se então a REU, expressa por:

$$REU = \frac{E_{OUT}}{E_{IN,P} + E_{IN}} \quad (3)$$

onde  $E_{IN,P}$  é a energia contida no combustível extraído diretamente da natureza. A REU, que é sempre menor ou igual à unidade, é útil para determinar o quanto de um dado estoque pode ser utilizado pelo resto da sociedade (Herendeen, 2004).

## 3. METODOLOGIA

Foram utilizadas informações referentes a um sistema fotovoltaico a ser instalado no Laboratório de Sistemas de Potência (LSP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O sistema é do tipo fotovoltaico híbrido<sup>1</sup>, que irá compor o estacionamento do laboratório, em uma estrutura para telhado, e tem como finalidade dar suporte para a realização de pesquisas na área de ESFV.

O sistema possui 28 módulos solares fotovoltaicas, Astronergy CHSM6610P-260, no qual cada módulo possui as seguintes especificações: (i) Potência: 260 Wp; (ii) Eficiência: 15,9%; (iii) Tipo de célula: policristalina; (iv) Tempo de produção linear: 25 anos.

Outro parâmetro importante para a determinação da quantidade de energia elétrica fornecida pela tecnologia fotovoltaica é o fator de qualidade, que descreve a relação entre a energia efetivamente gerada pelo módulo e os valores teóricos (Raugei, 2012). Adotou-se o valor de 0,75 por representar o valor base recomendado pela Agência Internacional de Energia.

Para obter os níveis de irradiação global média anual da cidade de Campina Grande/PB, recorreu-se ao programa SunData<sup>2</sup>, que fornece a média de irradiação solar diária média mensal (kWh/m<sup>2</sup>/dia) no valor de 5,4 para o local. Logo para a média anual têm-se o valor de 1971 kWh/m<sup>2</sup>/ano.

**Quadro 1 – Dados adotados para os cálculos de eficiência energética dos módulos fotovoltaicos.**

Tipo de célula	Silício Policristalino
Eficiência do módulo (%)	15,9
Tempo de vida (anos)	25
Fator de qualidade	0,75
Local de instalação	Campina Grande/ PB
Nível anual de irradiação solar global (kWh/m <sup>2</sup> /ano)	1971

Além disso, sabe-se que os equipamentos que compõem o sistema solar fotovoltaico passam por rigorosos processos de fabricação que requerem energia para:

- Produzir os materiais que compõem o módulo fotovoltaico;
- Manufaturar o módulo fotovoltaico;
- Transporte de materiais durante todo o ciclo de vida;
- Instalação do módulo fotovoltaico;
- Lidar com o desgaste de materiais;
- Operação e manutenção.

Devido à inexistência da cadeia de processos necessários para a manufatura dos componentes do sistema fotovoltaico em território nacional, informações de estudos realizados em outros países foram utilizados como referência para o cálculo dos indicadores energéticos.

Uma revisão da literatura verificou-se que poucos são os trabalhos que incluem os fluxos energéticos referentes à todas as etapas do ciclo de vida dos sistemas fotovoltaico, os quais incluem: a mineração e processamento do material bruto, manufatura do módulo e sistema fotovoltaico, operação e descarte. No Quadro 2 são apresentadas as informações relevantes que foram utilizadas para efeito de comparação e análise da viabilidade de instalação em Campina Grande.

**Quadro 2 – Resumo das informações para os estudos de ciclo de vida de módulos policristalinos.**

Local de instalação (Raugei, 2012), (Alsema, 2000), (Jungbluth, 2005), (Bizzari, 2007), (Wild-Scholten, 2013)	Holanda (2000)	Suíça (2005)	Itália (2007)	Espanha (2012)	China (2013)
Eficiência (%)	13,0	13,2	12,5	13,0	14,1
Tempo de vida (anos)	25	30	25	30	30
Fator de qualidade	0,75	0,80	0,80	0,75	0,77
Nível anual de irradiação (kWh/m <sup>2</sup> /ano)	1700	1100	1533	1700	1700
Demanda energética (MJ/m <sup>2</sup> )	5400	5910	9101	3057	2661

<sup>1</sup> O sistema solar fotovoltaico híbrido caracteriza-se por dispor de mais de uma forma de geração de energia elétrica. Pode-se apresentar sob várias configurações e requer algum tipo de controle capaz de integrar os vários geradores, de forma a otimizar a operação do sistema.

<sup>2</sup> O programa SunData desenvolvido pelo CRESESB/CEPEL, que tem como objetivo calcular a irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional [15].

#### 4. RESULTADOS

Foi realizado o cálculo dos indicadores utilizando as Equações (1) e (2), inicialmente o EROI e em seguida a REU. O estudo foi dividido em três casos, considerando a demanda energética da Espanha, da China e da Itália.

##### 4.1 EROI Caso 1

Utilizou-se como referência o valor da demanda energética de 3057 MJ/m<sup>2</sup> encontrado na Espanha pelo fato de possuir características territoriais semelhantes às de Campina Grande, bem como apresentar valores próximos ao valor médio calculado, resultando em:

$$EROI_{CG1} = \frac{E_{OUT}}{E_{IN}} = \frac{1971 \cdot 3,6 \cdot 25 \cdot 0,75 \cdot 0,159}{3057} = 6,92$$

onde 1971 kWh/m<sup>2</sup>/ano é a irradiação solar global, 3,6 MJ/kWh é um fator de conversão, 25 anos é o tempo de vida do módulo, 0,75 é o fator de qualidade do sistema fotovoltaico, 0,159 é a eficiência do módulo e 3057 MJ é a demanda energética por metro quadrado de módulo. O segundo termo da soma no denominador do cálculo do  $REU_{CG}$  reflete o total de energia que seria irradiada por metro quadrado, em MJ, durante o período de 25 anos em uma localização com irradiação solar global da ordem de 1971 kWh/m<sup>2</sup>/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.

Na Figura 2 é apresentada a evolução temporal deste indicador para os módulos policristalinos comparando o caso em que os módulos são instalados em Campina Grande com os estudos de caso apresentados no Quadro 2.

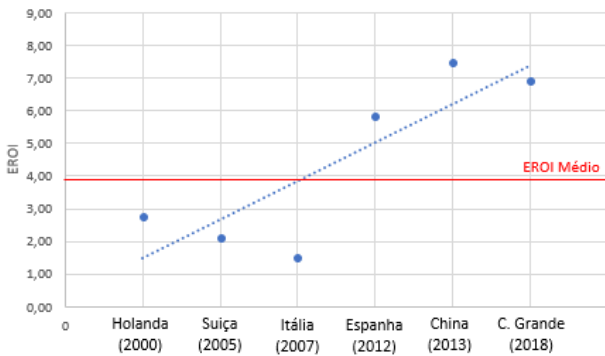


Figura 2 – Evolução do EROI - Módulos policristalinos no Caso 1.

##### 4.2 EROI Caso 2

Utilizou-se como referência o valor da demanda energética de 2661 MJ/m<sup>2</sup> encontrado na China, resultando em:

$$EROI_{CG2} = \frac{E_{OUT}}{E_{IN}} = \frac{1971 \cdot 3,6 \cdot 25 \cdot 0,75 \cdot 0,159}{2661} = 7,95$$

Na Figura 3 é apresentada a evolução temporal deste indicador para os módulos policristalinos comparando o caso em que os módulos são instalados em Campina Grande com os estudos de caso apresentados no Quadro 2, considerando o valor de demanda energética da China.

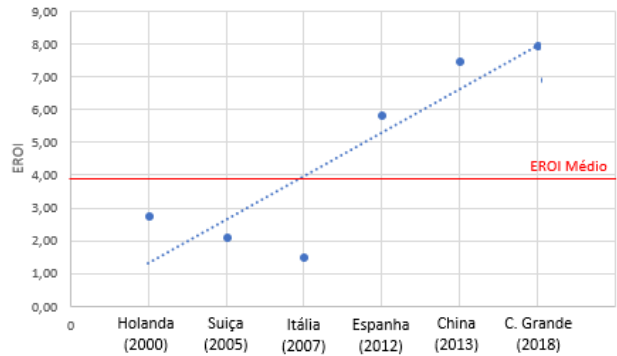


Figura 3 – Evolução do EROI - Módulos policristalinos no Caso 2.

##### 4.3 EROI Caso 3

Utilizou-se como referência o valor da demanda energética de 9101 MJ/m<sup>2</sup> encontrado na Itália pelo fato de apresentar o maior valor de demanda energética encontrado na literatura, resultando em:

$$EROI_{CG3} = \frac{E_{OUT}}{E_{IN}} = \frac{1971 \cdot 3,6 \cdot 25 \cdot 0,75 \cdot 0,159}{9101} = 2,32$$

Na Figura 4 é apresentada a evolução temporal deste indicador para os módulos policristalinos comparando o caso em que os módulos são instalados em Campina Grande com os estudos de caso apresentados no Quadro 2, considerando o valor de demanda energética da Itália.

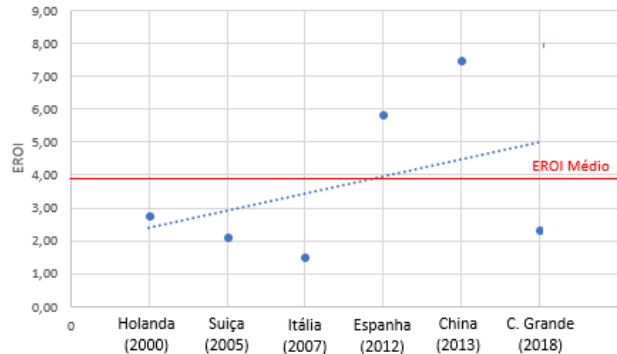


Figura 4 – Evolução do EROI - Módulos policristalinos no Caso 3.

O EROI médio para os dados do Quadro 2 foi de 3,95. Para os casos 1 e 2, Campina Grande apresentou um aumento do retorno de energia investida, quando comparada com o EROI médio, de respectivamente 24,8% e 101,3%. Já para o Caso 3, houve uma redução do retorno de energia investida de 41,26%.

##### 4.4 REU

Aplicando os valores referenciados em cada caso, obteve-se os seguintes resultados:

$$REU_{CG1} = \frac{E_{OUT}}{E_{IN,P} + E_{IN}} = \frac{1971 \cdot 3,6 \cdot 25 \cdot 0,75 \cdot 0,159}{3057 + (1971 \cdot 3,6 \cdot 25)} = 0,12$$

$$REU_{CG2} = \frac{E_{OUT}}{E_{IN,P} + E_{IN}} = \frac{1971 \cdot 3,6 \cdot 25 \cdot 0,75 \cdot 0,159}{2661 + (1971 \cdot 3,6 \cdot 25)} = 0,12$$

$$REU_{CG3} = \frac{E_{OUT}}{E_{IN,P} + E_{IN}} = \frac{1971 \cdot 3,6 \cdot 25 \cdot 0,75 \cdot 0,159}{9101 + (1971 \cdot 3,6 \cdot 25)} = 0,11$$

Os resultados obtidos para a REU foram relativamente constantes, aproximadamente 0,12 para todos os casos, sendo o REU médio calculado de 0,10.

Nas Figuras 5, 6 e 7, são apresentados, respectivamente, as REU calculadas para os Casos 1, 2 e 3.

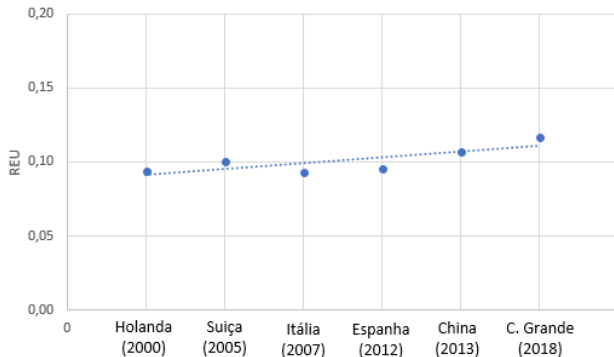


Figura 5 – Evolução da REU - Módulos policristalinos no Caso 1.

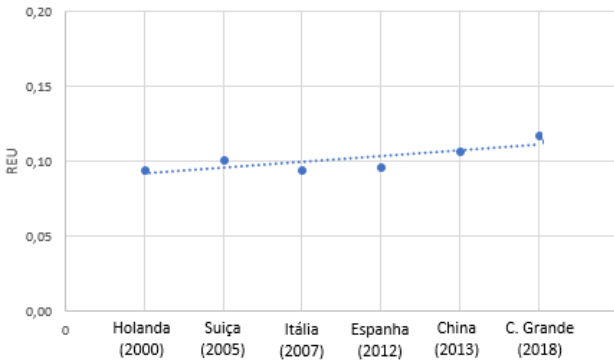


Figura 6 – Evolução da REU - Módulos policristalinos no Caso 2.

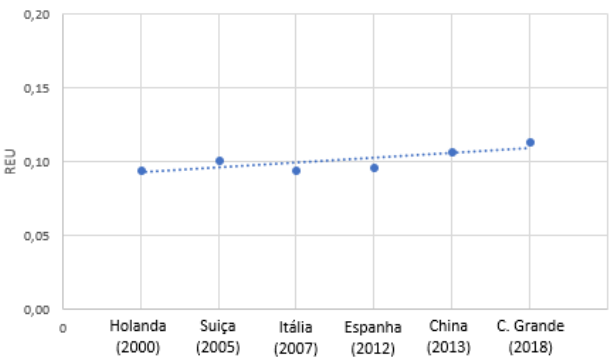


Figura 7 – Evolução da REU - Módulos policristalinos no Caso 3.

A partir dos valores obtidos verifica-se que a eficiência energética do ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica nas condições de irradiação solar, para todos os casos, é de aproximadamente 12%, considerando que a energia necessária para a construção do sistema fotovoltaico de Campina Grande seria a mesma utilizada em países europeus.

Nos cálculos posteriores observa-se que a REU tem maior impacto com aumento da eficiência dos módulos em comparação com a diminuição da demanda energética dos processos envolvidos na construção do sistema. Logo, variou-se a eficiência dos módulos em detrimento da constância dos outros parâmetros, afim de analisar a variação da REU, conforme apresentado na Figura 8. O caso analisado foi o da instalação do

sistema em Campina Grande com demanda energética da Espanha, caso 1.

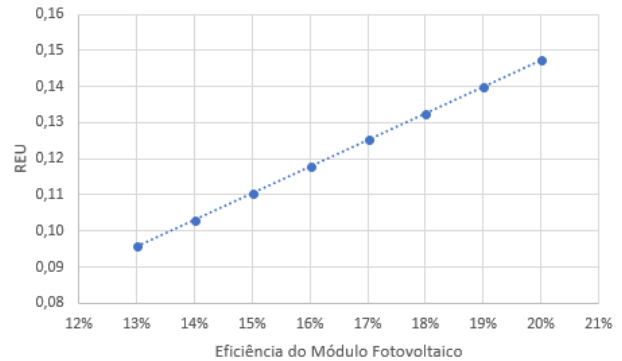


Figura 8 – REU para diferentes valores de eficiência dos módulos policristalinos instalados em Campina Grande/PB.

Conforme esperado, na Figura 8, observou-se um aumento linear da REU. Os valores da REU obtidos são relativamente baixos quando comparados às tecnologias de conversão de energia elétrica com a utilização de combustíveis fósseis. Porém, deve-se levar em conta que apenas as questões de custo energético são avaliadas para o ciclo de vida destas tecnologias.

## 6. CONCLUSÕES

A partir do sistema fotovoltaico analisado, nos Casos 1 e 2, verifica-se que o EROI médio é superior ao mínimo exigido para atender às demandas energéticas mais básicas da sociedade, estimado em 3,00 (ANEEL, 2014). Entretanto, para o Caso 3, o EROI foi inferior ao mínimo exigido, indicando o baixo retorno da energia investida, que implica em menor lucro, uma vez que haverá uma maior demanda de investimento na conversão de energia no processo de produção dos módulos fotovoltaicos. Ademais, considerando apenas os estudos mais recentes, a tecnologia solar fotovoltaica possui bons indicadores de evolução na sua eficiência, chegando a dobrar o valor do índice EROI.

Contudo, a evolução do indicador EROI para os casos considerados não é satisfatoriamente explicada pela regressão linear, fato esse decorrente da abrangência geográfica dos dados que foram utilizados para a obtenção dos resultados.

O avanço nas tecnologias e no conhecimento na área tem aumentando, tanto a eficiência dos módulos fotovoltaicos como diminuindo a energia necessária para a manufatura de todos os componentes do sistema. Fato esse que reflete positivamente no indicador EROI, apresentando valores até superiores aos encontrados na literatura.

A REU se manteve praticamente constante, por volta de 10% para todos os casos estudados. Tal resultado é relativamente baixo, refletindo a baixa densidade energética da radiação solar. O aumento da eficiência dos módulos e do fator de qualidade do sistema fotovoltaico tem um impacto muito positivo na energia útil gerada se comparado à redução na demanda energética para a construção do sistema.

Os estudos da tecnologia solar fotovoltaica apresentam indicativos de sua importância, ainda que existam grandes desafios a serem vencidos, principalmente os relacionados às características inerentes desta forma de conversão de energia e às dificuldades de armazenamento da energia produzida para utilização em larga escala.

No entanto, ainda é necessário um estudo mais detalhado referente aos processos realizados no ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos em Campina Grande, possibilitando mensurar de forma concreta e realística o valor da demanda energética nesta região.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à COPELE (Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) da Universidade Federal de Campina Grande pelo suporte financeiro e pela disponibilização da estrutura para a realização das pesquisas.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Perspectivas da Energia Solar e o Apoio do BNDES ao Setor. Seminário de Micro e Minigeração Distribuída. Abril. 2014.
- ALSEMA, E. A., 2000. Energy Payback Time and CO<sub>2</sub> emissions of PV Systems, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 8, pp 17-25.
- BHANDARI, K. P. et al. 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*, v. 47, p. 133-141, 2015.
- BIZZARI G., MORINI J. L., 2007. Life Cycle Analysis of Roof Integrated Photovoltaic Systems, *International Journal of Environmental Technology*, vol. 7, pp 134-146.
- CARVALHO, K.J.S. Sistema fotovoltaico distribuído integrado à rede elétrica: condições de operação e seus impactos. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- CEPEL. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. SUNDATA. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em maio de 2018.
- DZIMANO, B. S. G. Modeling of Photovoltaic Systems. 2008. Dissertação (Mestrado) —The Ohio State University, USA, 2008.
- 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.
- HERENDEEN, R. A. Energy analysis and EMERGY analysis—a comparison. *Ecological Modelling*, v. 178, n. 1-2, p. 227-237, 2004.
- JUNGBLUTH, N., 2005. Life Cycle Assessment of Crystalline Photovoltaics in the Swissecoinvent Database, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 119, pp 296-305.
- MELO, L. S. de, MEDEIROS, M. V. B., BRITO, N. S. D., SIMOES, M. C. S., SOUZA, L. L. de, DINIZ, D. S. 2018. Impactos Sociais da Geração distribuída fotovoltaica no Programa Minha Casa Minha Vida em Juazeiro/BA. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado. 2018.
- MURPHY, D.J., HALL, C.A.S., 2010. Year in review—EROI or energy return on (energy) invested. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1185, 102–118.
- OECD/IEA. Organisation for Economic Co-Operation and Development. Solar Energy: Solar Photovoltaic. 2017. Disponível em: <<https://www.iea.org/topics/renewables/solar/>>. Acesso em: 03 jun. 2018.
- 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.
- 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.