

ANÁLISE ECONÔMICA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE DE 3,36 kWp INSTALADO EM BELÉM, PA

Edinaldo José da Silva Pereira – edinaldojsp@ufpa.br

Renato Luz Cavalcante– renatolc@ufpa.br

Hélio de Souza Morais Júnior – heliomorais@ufpa.br

Wilson Negrão Macêdo – wnmacedo@ufpa.br

Marcos André Barros Galhardo – galhardo@ufpa.br

João Tavares Pinho – jtpinho@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Elétrica

Resumo. Este trabalho apresenta uma análise econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) com potência de 3,36 kWp, instalado em Belém-PA, no prédio do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE), nas coordenadas geográficas 01°27'21"S e 48°30'14"O. O sistema é parte de quatro subsistemas fotovoltaicos monitorados no GEDAE. A análise econômica está fundamentada no comportamento de três parâmetros: valor presente líquido, VPL, custo da energia produzida, CEN, e tempo de retorno (payback time), PT. Estes parâmetros possibilitam aferir preliminarmente a viabilidade econômica do SFCR, indicando se o balanço de despesas e receitas ao longo do tempo de vida útil é positivo, se o valor da energia produzida é comparável àquele praticado pela concessionária local, e qual o horizonte de recuperação do investimento na aquisição, operação e manutenção do sistema. Os resultados apresentados mostram que a viabilidade econômica do SFCR no Brasil e a consequente atratividade para os investidores, só é alcançada a partir da concessão de subsídios, não inferiores a 40%, ao custo de aquisição dos equipamentos de geração de energia e condicionamento de potência, e taxas de desconto também inferiores a 12%/ano.

Palavras-chave: Energia Solar, Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede, Análise Econômica

1. INTRODUÇÃO

No mundo, onde a busca por alternativas energéticas menos agressivas ao meio ambiente é um objetivo claro, não se pode questionar a importância da viabilidade técnica dessas alternativas; porém, a viabilidade econômica das mesmas não deve ser menos valorizada. No Brasil, a viabilidade técnica é uma realidade, como em outras partes do mundo, mas a questão econômica ainda é penalizada pela falta de incentivos, em especial à energia solar. Os resultados encontrados mostram que a paridade tarifária, quando tomado como referência os consumidores residenciais de baixa tensão, já foi atingida em algumas partes do País, porém ainda está muito distante quando comparada com as tarifas praticadas pelas concessionárias de energia para os consumidores industriais, por exemplo. Verifica-se ainda que o custo inicial para aquisição e instalação de um SFCR não é um investimento atrativo, quer pelo seu valor elevado, quer pelo longo tempo de recuperação do capital investido. Entretanto, com o apoio governamental, especialmente na forma de subsídio ao capital inicial investido, a atratividade econômica dos SFCRs pode melhorar sensivelmente, fazendo crescer o número de Wp instalados no país, criando novos postos de trabalho, e desenvolvendo uma tecnologia ainda incipiente na indústria nacional.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

O sistema é constituído por um gerador fotovoltaico de 3,36 kWp, um inversor de 2,8 kW, e um sistema de aquisição de dados. O gerador FV é constituído por 28 módulos fotovoltaicos orientados a 19° NE e inclinados de 14° com relação à horizontal, sendo 15 módulos Kyocera KC 120 e 13 Astropower AP120, cada um com potência nominal de 120 Wp. Para uma configuração mais otimizada do gerador fotovoltaico, foram constituídos dois *strings* em paralelo, com 14 módulos conectados em série em cada um. Um dos *strings* é composto por 14 módulos KC120, enquanto que o outro é formado por 13 módulos AP120 mais 1 módulo KC120. O inversor Xantrex, modelo GT2.8-NA-240/208 UL-05 é usado para conectar o gerador FV à rede elétrica. A Fig. 1 mostra o gerador fotovoltaico instalado no telhado da ala norte do GEDAE e Fig. 2. Mostra o diagrama unifilar do SFCR e do sistema de aquisição de dados.



Figura 1– Gerador fotovoltaico sobre o telhado do GEDAE.

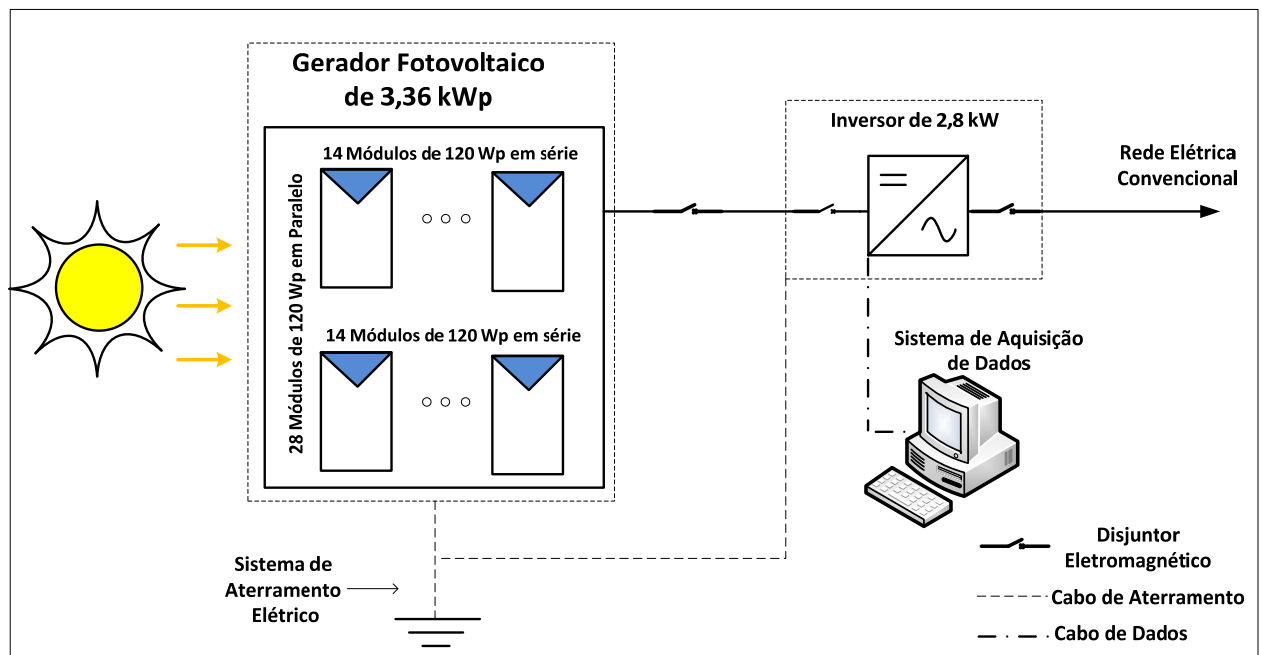


Figura 2– Diagrama unifilar do SFCR e do sistema de aquisição de dados.

O processo de aquisição e visualização das grandezas elétricas, tanto do barramento CC quanto do barramento CA do SFCR, é realizado por meio de um microcomputador dedicado.

Uma amostra dos parâmetros elétricos é obtida diretamente do inversor, por meio do cabo serial RS232 e do software GT View 1.7 e armazenado em arquivo *Microsoft Excel*.

Com o GT View 1.7 é possível a aquisição dos dados em tempo real (com intervalos de dois segundos entre cada aquisição). A Fig. 3 mostra a tela principal do programa, onde são exibidos os seguintes parâmetros: potência CA instantânea, tensão e corrente CA e CC, frequência de operação, temperatura do dissipador de calor, tensão do ponto de máxima potência, pico de geração CA, tempo diário de operação do sistema, eficiência de conversão, produção de energia elétrica diária e total do sistema.

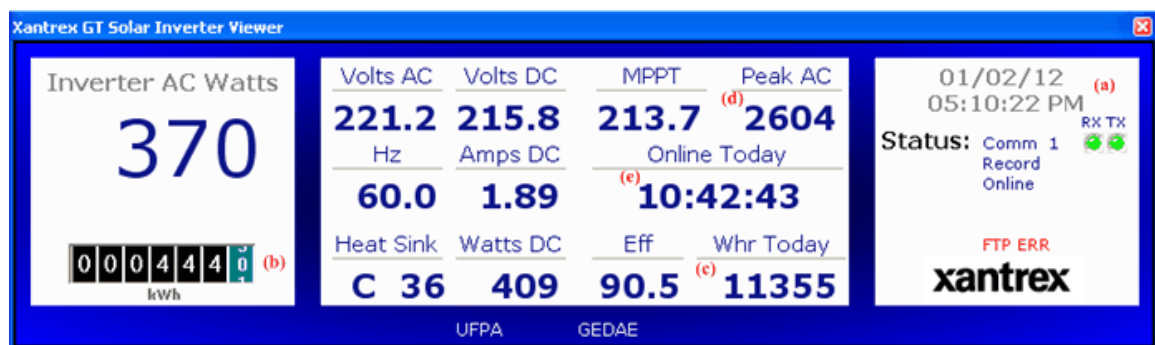


Figura 3– Tela principal do programa de aquisição de dados.

3. METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ANÁLISE ECONÔMICA

A determinação de *VPL*, *CEN* e *PT* pressupõe o conhecimento dos valores mostrados na Tab. 1. Todos os valores monetários adotados são provenientes de custos efetivamente praticados em Belém. A produtividade estabelecida, 1.200 kWh/kWp/ano, admite uma geração mensal bastante conservadora para a região. A taxa de desconto atende a um índice médio de aplicações para pequenos investidores em bancos oficiais, enquanto que a inflação é suposta equivalente àquela estimada como meta pelo Governo Federal no Brasil. O tempo de vida útil do SFCR é baseado no tempo máximo de utilização dos módulos fotovoltaicos. O valor da energia entregue pelo SFCR é tomado como igual ao praticado pela concessionária de energia local, 0,537 R\$/kWh considerando a fatura de junho de 2012, equivalente a 0,269 US\$/kWh, para consumidores residenciais de baixa tensão, incluindo todos os encargos à tarifa. A inflação anual de 7,3% é considerada como a inflação média registrada através do IPCA, Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo, de 1995 a 2011.

Tabela 1. Parâmetros de entrada para análise do SFCR.

PARÂMETRO	VALOR
Paridade Monetária	R\$ 2,00 = US\$ 1,00
Potência do Inversor, P_{inv}	2,8 kW
Potência do Gerador FV, P_{ger}	3,36 kWp
Produtividade Anual do SFCR, $Prod$	1.200 kWh/kWp/ano
Taxa de Desconto, i	8 %/ano
Tempo de Vida Útil do Sistema, N	30 anos
Custo de Aquisição do Gerador FV, C_{FV}	2,10 US\$/Wp
Custo de Aquisição do Inversor, C_{inv}	1,20 US\$/W
Valor da Energia Entregue pelo SFCR, ps	0,269 US\$/kWh
Inflação Anual, g	7,3 %

O custo inicial para aquisição dos principais equipamentos do SFCR, C_{aq} , é obtido pela Eq. (1).

$$C_{aq} = C_{FV} + C_{inv} \quad (1)$$

A consideração das despesas associadas com a instalação do SFCR é um fator importante no custo do ciclo de vida útil e no valor da energia produzida pelo mesmo e varia em diversas partes do mundo, de acordo com o custo dos equipamentos e com a forma de instalação do sistema. Um valor de 20% do custo total dos equipamentos de geração e condicionamento de potência é usado no Texas, Estados Unidos (SECO, 2012), e na Índia (Chel et al., 2009). De um modo geral, o custo do Wp instalado nos Estados Unidos pode variar de US\$ 3,00 a US\$ 5,00 (Zweibel, 2010), dependendo do tamanho do sistema. De fato, o custo de instalação de um SFCR depende de vários parâmetros como: custo de aquisição do gerador fotovoltaico, do inversor, das estruturas físicas de sustentação e das despesas com mão-de-obra. No presente trabalho o custo de instalação do SFCR é calculado como 10% do custo de aquisição do gerador fotovoltaico, adicionado com 2% do custo de aquisição do inversor. Estas proporções equivalem aos valores efetivamente gastos quando da instalação do SFCR, resultando em US\$ 3,33 por cada Wp instalado. Portanto, C_{inst} é dado por:

$$C_{inst} = 0,1 \cdot C_{FV} + 0,02 \cdot C_{inv} \quad (2)$$

Pode-se escrever o custo de aquisição e instalação do gerador fotovoltaico e do inversor, C_{in} , como:

$$C_{in} = 1,1 \cdot C_{FV} + 1,02 \cdot C_{inv} \quad (3)$$

Ao longo da vida útil do SFCR, estão previstas duas substituições de inversor, a primeira no ano 10 e a outra no ano 20. O custo de reposição, C_{REP} , é calculado pela Eq. (4), onde é considerada a inflação do período e a data da substituição do inversor.

$$C_{REP} = \frac{(C_{inv} + (C_{inv} \cdot g \cdot 10))}{(1+i)^{10}} + \frac{(C_{inv} + (C_{inv} \cdot g \cdot 20))}{(1+i)^{20}} \quad (4)$$

O custo anual de operação e manutenção do SFCR, C_{OM} , é calculado como 1% de $(C_{FV} + C_{inv})$. Um custo anual de 0,25% das despesas com o SFCR instalado já era praticado na Espanha em 2006 (Bernal-Augustin e Dulfo-Lopez,

2006), o que torna bastante razoável o valor atribuído neste trabalho. Este valor, expresso pela Eq. (5), é ainda atualizado anualmente, considerando a inflação anual e a taxa de desconto praticada pelo mercado.

$$C_{OM} = \sum_{j=1}^N \frac{0,01 \cdot (C_{FV} + C_{inv}) \cdot (1+g)^j}{(1+i)^j} \quad (5)$$

O custo do ciclo de vida útil, C_{CV} , do SFCR é dado pela Eq. (6).

$$C_{CV} = C_{in} + C_{REP} - P \quad (6)$$

onde P é o patrimônio após a vida útil, do SFCR. O patrimônio é calculado pela Eq. (7).

$$P = \frac{(C_{FV} + C_{INV})}{(1+i)^N} \quad (7)$$

O custo do ciclo de vida anualizado, C_{CVA} , é calculado pela Eq. (8).

$$C_{CVA} = C_{CV} \cdot FRC \quad (8)$$

onde FRC é o fator de recuperação de capital, dado pela Eq. (9).

$$FRC = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (9)$$

Pode-se determinar C_{EN} e VPL através das Eqs. (10) e (11), respectivamente.

$$C_{EN} = \frac{C_{CVA}}{Prod} \quad (10)$$

onde $Prod$ é dado na Tabela 1.

$$VPL = -C_{in} + P - C_{REP} + R \quad (11)$$

onde R é a remuneração obtida com a produção de energia pelo SFCR. A Eq. (12) determina R .

$$R = \sum_{j=1}^N \frac{ps \cdot Prod \cdot (1+g)^j}{(1+i)^j} - \sum_{j=1}^N \frac{C_{OM} \cdot (1+g)^j}{(1+i)^j} \quad (12)$$

onde ps , dado em US\$/kWh, é o valor da energia entregue pelo SFCR.

O tempo de retorno (*payback*), calculado na Eq. (13), identifica o número de anos necessários para que o VPL seja nulo. Portanto, deve-se obter o valor de N , que corresponderia ao *payback*, PT , através das Eqs. (11) e (12), fazendo $VPL = 0$.

$$0 = C_{in} + P - C_{REP} + \sum_{j=1}^{PT} \frac{ps \cdot Prod \cdot (1+g)^j}{(1+i)^j} - \sum_{j=1}^{PT} \frac{C_{OM} \cdot (1+g)^j}{(1+i)^j} \dots\dots\dots(13)$$

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos com a aplicação das Eqs. (1) a (13) estão expressos na Tab. 2.

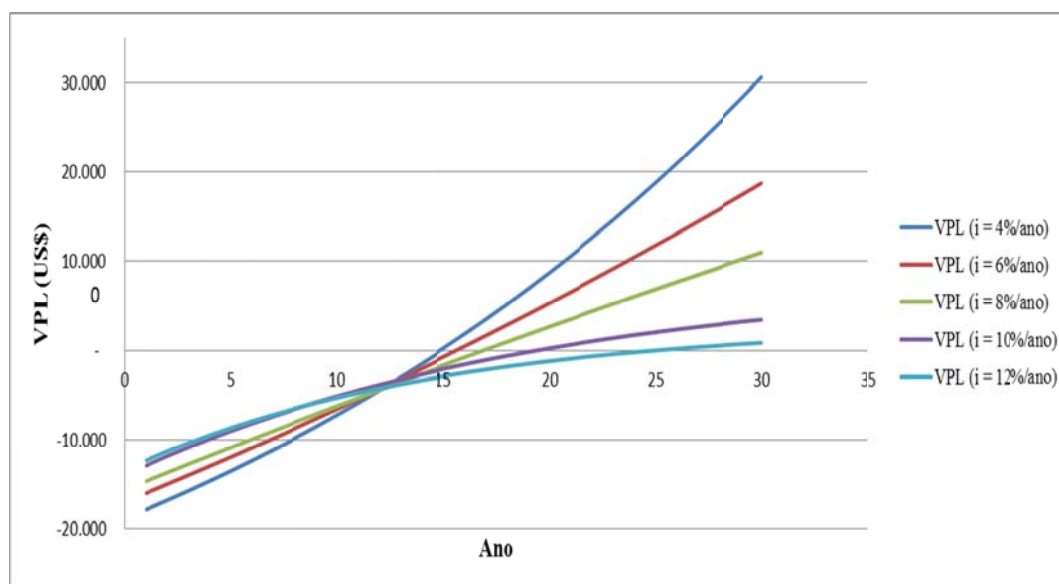
Para o cálculo do VPL foi considerado que o SFCR entrega toda a energia produzida à rede da concessionária pelo mesmo valor da tarifa por ela praticada, 0,269 US\$/kWh. Ao patrimônio foi atribuído o valor nulo, devido aos módulos fotovoltaicos e ao terceiro inversor terem chegado ao final da vida útil após 30 anos de operação, não havendo possibilidade de obter qualquer renda com uma posterior comercialização.

Tabela 2. Resultados da análise econômica para o SFCR.

Custo com a primeira reposição do inversor no ano 10	US\$ 2.692,00
Custo com a segunda reposição do inversor no ano 20	US\$ 1.773,00
Custo com a instalação do gerador FV	US\$ 706,00
Custo com a instalação do inversor	US\$ 67,00
Custo inicial total para aquisição e instalação do SFCR	US\$ 11.189,00
Custo com O&M ao longo da vida útil do SFCR	US\$ 2.830,00
<i>VPL</i>	US\$ 10.981,00
<i>CEN</i>	0,345 US\$/kWh
<i>PT</i>	17 anos

Observa-se que o custo da energia produzida pelo SFCR é aproximadamente 28,25% superior ao valor de referência cobrado pela concessionária local em unidades consumidoras residenciais, acrescida de todos os impostos. Esta diferença é bastante acentuada quando comparada com a tarifa de energia elétrica cobrada das indústrias no Pará, da ordem de 0,15 US\$/kWh. Esta situação reforça a necessidade de algum tipo de subsídio ou incentivo ao desenvolvimento dos SFCRs no Brasil. Mesmo para o consumidor residencial não há atratividade financeira para investir em SFCRs, já que o tempo de recuperação com o investimento é elevado, 17 anos no presente caso. Além disso, o custo inicial para aquisição e instalação do SFCR, US\$ 11.189,00, é desestimulador para um sistema de 3,36 kWp, que poderia atender as necessidades de uma residência de classe média, produzindo em torno de 100 kWh/kWp/mês. Contudo, se um incentivo à aquisição do gerador fotovoltaico e do inversor fosse concedido ao consumidor, a possibilidade de atratividade para os SFCRs aumentaria consideravelmente. Partindo deste pressuposto, alguns cenários são analisados, considerando a influência de i e C_{aq} em *VPL*, *PT* e *CEN*.

A Fig. 4 apresenta o comportamento do *VPL*, considerando que a taxa de desconto assume valores de 4%/ano, 6%/ano, 8%/ano, 10%/ano e 12%/ano.

Figura 4– Comportamento de *VPL* com a taxa de desconto praticada.

Observa-se que a atratividade para o investimento em SFCRs, quando a taxa de desconto supera 10%/ano, é muito baixa, resultado de valores negativos de *VPL*, mesmo após 20 anos de operação do sistema.

Observa-se que taxas de desconto da ordem de 12%/ano só apresentam um *VPL* positivo após 23 anos de operação, o que é um tempo muito longo para investimento. Neste caso, após 30 anos de operação do SFCR, o *VPL* chegaria a apenas US\$ 2.281,00, o que é insignificante para o tempo de operação do projeto e o investimento realizado. Por outro lado, uma taxa de desconto menor, da ordem de 4%/ano, típica de economias mais estáveis, proporcionaria um *payback* de 15 anos e um *VPL* de US\$ 30.610,00 após 30 anos de operação do sistema. De qualquer modo, apesar do atrativo *VPL*, ainda é um tempo considerável para recuperação do investimento.

Outro fator que influencia fortemente os resultados da análise é o custo inicial de aquisição do gerador fotovoltaico e do inversor e, conseqüentemente, o custo de instalação dos mesmos. Se um subsídio inicial para a aquisição desses equipamentos fosse concedido pelos órgãos responsáveis pelo desenvolvimento das energias renováveis no Brasil, a atratividade dos SFCRs seria uma realidade, contribuindo para a geração de empregos e preservação do meio ambiente no país. A Fig. 5 mostra o comportamento do *VPL* para as taxas de desconto já definidas anteriormente, considerando possíveis subsídios variando de 0 a 70% do valor de C_{aq} .

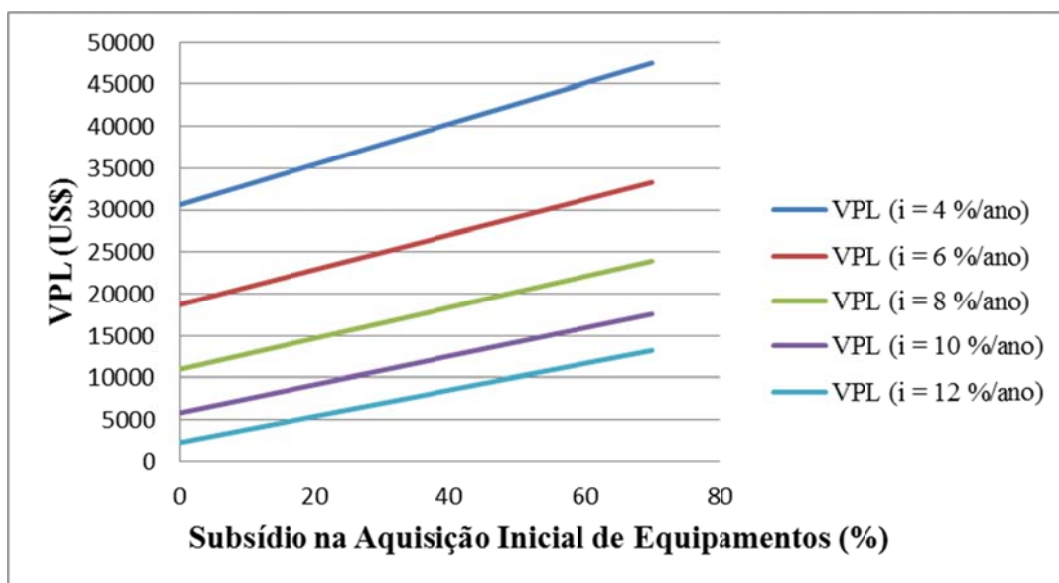


Figura 5– Comportamento de *VPL* com o subsídio a *Caq*.

Observa-se que um subsídio de 20% já proporciona um *VPL* de pelo menos 1/2 do custo total para aquisição e instalação do SFCR. Observando apenas o *VPL*, pode-se acreditar que esta situação seria suficiente para atrair o interesse de pequenos investidores. Entretanto, o *Caq* restante ainda seria elevado.

A Fig. 6 apresenta a influência do subsídio ao *Caq* sobre o custo da energia produzida pelo SFCR. Verifica-se que sem qualquer subsídio, apenas taxas de desconto menores que 4 %/ano poderiam proporcionar um *CEN* da ordem daquele praticado pela concessionária local, o que hoje é irreal no Brasil. Entretanto, subsídios da ordem de 30% já permitiriam uma vantagem no uso dos SFCRs, considerando taxas de desconto inferiores a 10%/ano. O custo de produção da energia pelo SFCR também sofre influência da taxa de desconto praticada, porque os valores das reposições do inversor dependem desta última, conforme expresso na Eq. (4) e mostrado na Fig. 6.

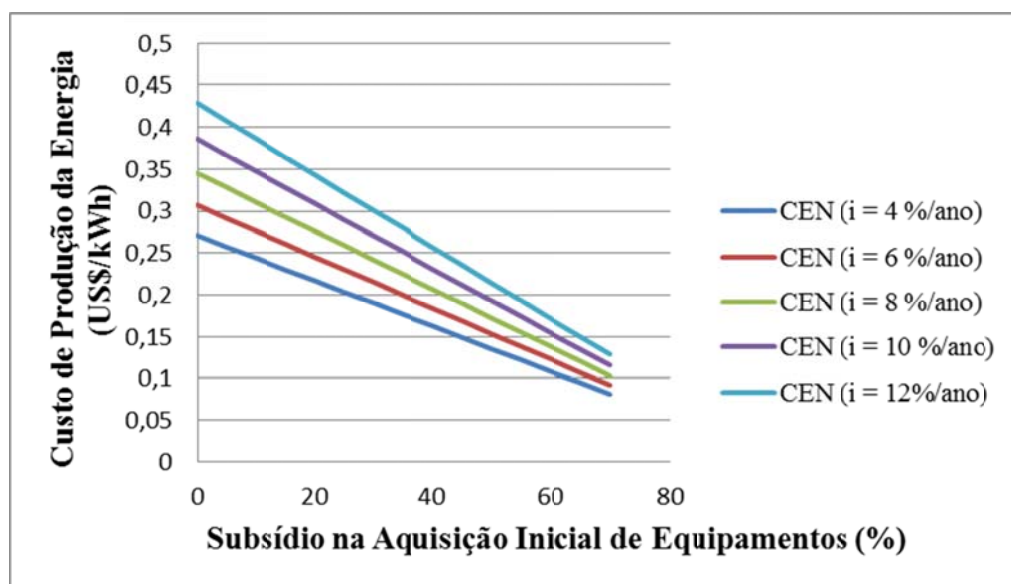


Figura 6– Comportamento de *CEN* diante de *Caq*.

O *payback* também é sensível ao subsídio a *Caq*. Enquanto que a ausência de qualquer subsídio alonga bastante o *PT*, a Fig. 7 mostra que um subsídio da ordem de 30% já coloca o *PT* em valores que chegam a no máximo 13 anos para qualquer taxa de desconto até 12%/ano. A presença de patamares constantes, ao longo das curvas da Fig. 7, deve-se ao arredondamento dos valores de *PT* para o número inteiro imediatamente superior ao valor calculado. Por exemplo, na curva para *i* igual a 8%/ano, para os subsídios tanto de 10% quanto de 15% foi considerado o valor de 15 anos.

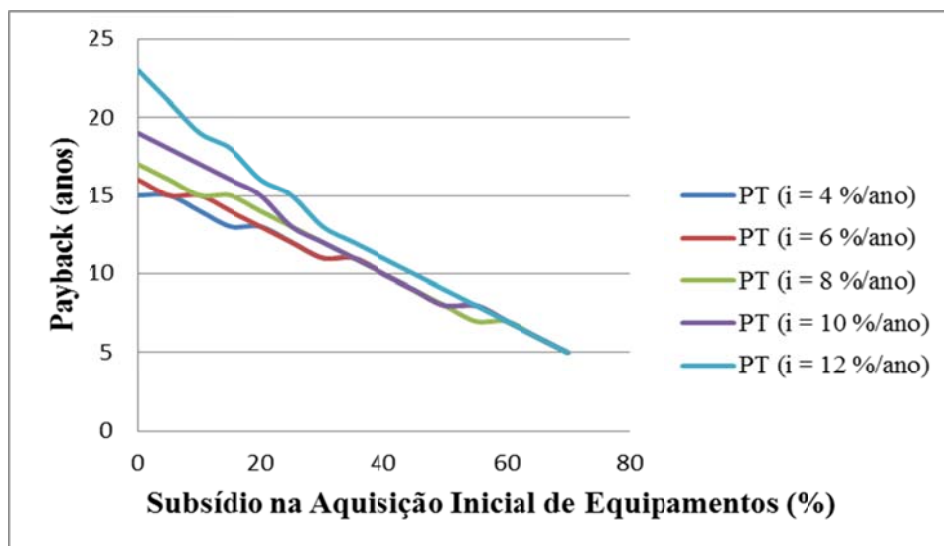


Figura 7– Comportamento de PT em função do subsídio a C_{aq} .

CONCLUSÃO

A utilização da energia solar e o desenvolvimento da indústria especializada é uma exigência para qualquer país que tenha a proteção do meio ambiente como meta. Neste sentido, o uso dos SFCRs, alvo de crescente tendência mundial, precisa ser incentivado no Brasil, quer pela baixa agressão ambiental, pela geração de postos de trabalho e de um novo viés industrial, pela necessidade de diversificar a matriz energética nacional, ou ainda pela competitividade econômica com as fontes convencionais de energia. Este trabalho mostra que a paridade tarifária para os SFCRs já é factível no Brasil, quando esta relação é feita com a tarifa aplicada aos consumidores residenciais de baixa tensão e um subsídio mínimo de 30% na aquisição dos equipamentos de geração e condicionamento de energia é concedida ao investidor. Esta realidade, entretanto, não é garantia de investimentos no setor, porque o custo inicial para aquisição e instalação dos SFCRs, mesmo subsidiado, ainda é muito elevado, e o tempo de recuperação do investimento é relativamente longo, o que certamente inibe os investimentos no setor. De todo modo, uma possibilidade viável para incentivar o uso dos SFCRs e o desenvolvimento de uma indústria fotovoltaica nacional, como ocorreu em vários países, é através do estabelecimento de subsídios à aquisição de seus principais equipamentos, módulos fotovoltaicos e inversor, possibilitando uma maior atratividade para investimentos na geração de energia fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

- Bernal-Agustín, José L., Dufo-López, Rodolfo, 2006. Economical and environmental analysis of grid connected photovoltaic systems in Spain, *Renewable Energy*, vol. 31, n.8, pp. 1107-1128.
- Chel, A., Tiwari, G. N., Chandra, A., 2009, Simplified method of sizing and life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic system, vol. 41, pp. 1172-1180.
- SECO, State Energy Conservation Office, Austin, Texas, Estimating PV system size and cost, fact sheet n. 24, pp. 1-4. www.infinitepower.gov, acessado em 16 de abril de 2012.
- Zweibel, K., 2010. The Solar Review – GW Solar Institute. www.thesolarreview.org, acessado em 16 de abril de 2012.

ECONOMIC ANALYSIS OF A 3.36 kWp PHOTOVOLTAIC SYSTEM CONNECTED TO THE GRID INSTALLED IN BELÉM, PA

Abstract. This work presents an economic analysis of a 3.36 kWp-grid-connected photovoltaic system, installed in Belém-PA, on the building of the Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE), at the geographic coordinates 01°27'21"S e 48°30'14"W. The system is part of four PV subsystems monitored at GEDAE. The economic analysis is based on the behavior of three parameters: the net present value, the cost of produced energy, and the payback time. These parameters permit a preliminary evaluation of the economic feasibility of the system, indicating whether the cost balance along the lifetime is positive, whether the cost of produced energy is comparable to the one used by the local utility, and which is the payback time, considering the system's acquisition, operation, and maintenance costs. The results showed that the economic feasibility of SFCR in Brazil and a consequent attractiveness to investors is only achieved from the granting of subsidies, not less than 40% of the power generation and power conditioning equipment acquisition cost, and interest rate also under 12%/year.

Key words: Solar Energy, Grid-Connected Photovoltaic Systems, Economic Analysis.