

ABORDAGEM AMBIENTAL E ECONÔMICA SOBRE A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA IMPLANTADA EM UM INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO NO BRASIL

Fabricio Neves de Sá¹, Albemerc Moura de Moraes²

¹Instituto Federal do Piauí, Campus Floriano
Rua Francisco Urquiza Machado, 462 - Meladão, Floriano – PI.
(55) (86) 99997-1482. E-mail fabricio.neves@ifpi.edu.br

²Grupo Interdisciplinar de Pesquisa em Energia Solar (GIPES). Universidade Federal do Piauí
Bairro Ininga - Teresina – PI.
(55) (89) 99415-8967 E-mail albemerc@ufpi.edu.br

RESUMO: O presente trabalho busca analisar, sob o viés ambiental e econômico, o sistema fotovoltaico do Instituto Federal do Piauí, campus Floriano, Brasil. Para isso, foi realizado o levantamento da produção dos 4 anos de operação do sistema, consumo de energia do campus, como também a quantificação do CO₂ evitado para atmosfera. Verificou-se que desde sua instalação, que o sistema produziu um total de 1.016 MWh, atendendo a 39% do consumo do campus. A economia nesse período foi de R\$ 443.742 (U\$D 86.500¹), gerando um lucro (valor presente líquido) de R\$ 739.618 (U\$D 144.175²) ao final da vida útil do sistema e *payback* estimado em 15 anos. Quanto ao benefício ambiental, o campus deixou de emitir 442 toneladas de CO₂ na atmosfera no período analisado. Concluiu-se que o investimento feito pela Instituição possui viabilidade econômica, apesar do alto tempo de retorno. É essencial que instituição mantenha suas medidas de economia de energia, no intuito de reduzir custos, como também reduzir suas emissões de CO₂ para a atmosfera. Ademais, é importante que o campus Floriano planeje o destino ambientalmente correto dos módulos ao final da sua vida útil.

Palavras chave: Abordagem ambiental e econômica. Energia solar. Instituto Federal

INTRODUÇÃO

De acordo com Pereira et al. (2017), o aumento da demanda energética, em conjunto com a possibilidade de redução da oferta de combustíveis convencionais e a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente estão impulsionando a transição para o uso de fontes energéticas menos poluentes e renováveis. Friman (2017) complementa que a educação é um passo fundamental para fazer essa transição, e afirma que as tecnologias de energia renovável ainda necessitam de reformas regulatórias e incentivos econômicos para que sua utilização se torne, cada vez mais, uma realidade.

O campus Floriano do Instituto Federal do Piauí (IFPI) é uma instituição de ensino que oferece cursos técnicos e superiores. possui mais de vinte anos de existência e é um dos campi mais antigos dessa Instituição. No início do ano de 2015, a gestão do campus decidiu investir na instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR), no intuito de atender parte de sua demanda de energia elétrica

¹ Valor convertido na cotação de U\$D 1 = R\$ 5,13 R\$, com base na cotação média de janeiro à outubro do ano de 2020.

² *Idem*

e na expectativa da utilização do sistema como ferramenta de aprendizado. Após os procedimentos licitatórios, foi implantado o sistema, começando a operar em junho de 2016.

Segundo Reis e Silveira (2012), o uso direto da energia solar fotovoltaica para satisfazer as necessidades humanas é vantajoso, pois não interfere no equilíbrio térmico da Terra, sendo que não há liberação de gases de efeito estufa (GEE) pelos módulos fotovoltaicos durante a produção de eletricidade. Para Tolmasquim (2016), a principal vantagem é justamente a ocorrência de poucos impactos socioambientais e ainda que a alteração da paisagem seja o principal impacto decorrente da instalação de módulos fotovoltaicos, este pode ser mitigado através de soluções de arquitetura e *design*, ou através da evolução tecnológica dos módulos. Ademais, Miller e Spoolman (2015) apontam para a facilidade operacional de instalar e mover esses módulos, se necessário.

No contexto brasileiro, Buiatti et al. (2016) afirmam que ao considerar o potencial de crescimento real de utilização da energia solar fotovoltaica conectada à rede, o cenário de redução de emissões de CO₂ também deve ser impactado significativamente, ao reduzir a participação das termelétricas na matriz energética. O autor conclui que, no Brasil, as emissões de CO₂ pelo Sistema Interligado Nacional (SIN) são relativamente baixas devido à alta participação das usinas hidrelétricas na composição da matriz energética. As células solares não emitem gases de efeito estufa, embora não sejam livres de CO₂, pois os combustíveis fósseis geralmente são usados para produzir e transportar os painéis. Miller e Spoolman (2015) complementam que essas emissões são pequenas quando comparadas com aquelas do uso de combustíveis fósseis.

O último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) estabelece um novo limite para a temperatura global de referência: 1,5 °C, em relação ao período pré-industrializado. Será necessário cobrir todos os cenários possíveis de produção de emissões de GEE, para uma projeção das mudanças climáticas até o ano 2100. Isso implicaria em tomar decisões em relação às tendências presentes e futuras em a gestão de recursos humanos, naturais, bens e serviços, econômicos, tecnológicos e políticos (Saez e Garzon, 2019).

Consoante Acikgoz (2011), a energia é essencial para o desenvolvimento socioeconômico, e a sua disponibilidade de forma abundante, a preços acessíveis e com baixos riscos ambientais, é condição para uma economia sustentável. De acordo com Rocha et al. (2017), o Brasil tem um bom potencial de radiação solar em todo o seu território, no entanto, devido ao atual estágio de evolução e à cadeia produtiva da indústria fotovoltaica brasileira, os altos custos ainda limitam a expansão dessa tecnologia, uma vez que o custo do investimento impacta diretamente a viabilidade de um projeto. No entanto, Pinho e Galdino (2014) afirmam que os custos têm apresentado reduções significativas, fazendo com que a geração fotovoltaica já se torne competitiva com relação a outras fontes de geração de eletricidade.

Partindo do contexto apresentado, o presente trabalho busca responder os seguintes questionamentos: A implantação de um sistema fotovoltaico é viável economicamente para uma instituição pública de ensino? Qual a relevância da Instituição no tocante à não emissão de CO₂ resultante da operação do sistema? No intuito de responder aos questionamentos levantados, foram definidos os seguintes objetivos específicos: verificar a produção de energia elétrica do SFCR e o consumo do campus; analisar o retorno financeiro do investimento; e quantificar o CO₂ evitado para a atmosfera devido à operação do sistema.

METODOLOGIA

O campus que é situado no município de Floriano, Estado do Piauí, Brasil, possui em torno de 80 professores, 62 técnico-administrativos, 39 servidores terceirizados e um total de 1.178 alunos, funcionando nos turnos manhã, tarde e noite. Em termos de estrutura física, o campus conta com 10 salas de aula, laboratórios, setor médico, refeitório, biblioteca, auditórios, salas administrativas, áreas

de esporte, academia e áreas verdes. Quanto ao SFCR, Valadares (2016), afirma que o mesmo ocupa, aproximadamente, 1.122 m² de telhado do campus e possui uma potência instalada de 150 kWp, distribuídos em 5 arranjos fotovoltaicos. Existem arranjos de 34 módulos, de 60 módulos, de 110 módulos, e outros dois arranjos de 228 módulos, resultando em 660 módulos no total. O investimento total foi na ordem de R\$ 1.150.500, que envolveu os equipamentos, a elaboração do projeto e o treinamento com funcionários do campus. A Figura 1 apresenta imagem aérea do campus, com destaque para o sistema de fotovoltaica implantado sobre o telhado da Instituição.



Figura 1: Disposição dos módulos fotovoltaicos no telhado do campus Floriano

Produção de energia: Previamente à análise ambiental e econômica foi necessário realizar um levantamento da produção de energia do SFCR nos seus 4 anos de operação, na seguinte sequência: ano 1 (junho 2016-maio 2017); ano 2 (junho 2017-maio 2018); ano 3 (junho 2018-maio 2019); e ano 4 (junho 2019-maio 2020). A produção de energia do sistema foi conhecida através do *software* Sunny de monitoramento dos inversores (SMA Sunny Tripower - SIW500). O consumo de energia do campus foi verificado através das contas de energia emitidas pela empresa concessionária de energia, que mostram, também a quantidade de energia injetada na rede pública pelo sistema. Foi realizada uma projeção de produção para o restante da vida útil com base na produção dos primeiros 4 anos de operação do sistema. Foi considerado também a perda gradativa de produção dos módulos fotovoltaicos no decorrer do tempo, que se estima em 0,5% ao ano, de acordo com Montenegro (2013); Pinho e Galdino (2014); Nakabayashi (2014); e ANEEL (2017).

Análise do retorno financeiro: Para a realização do retorno financeiro, foram utilizados os critérios *payback* descontado, Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR), no intuito de analisar a viabilidade econômica do investimento no SFCR do campus Floriano. Segundo Brigham e Houston (1999, p. 381), o *payback*, ou período de recuperação do investimento, pode ser definido como “o número de anos que se espera ser necessário para recuperar o investimento original”. Neste trabalho, foi utilizado o *payback* descontado, que considera os benefícios gerados (lucros), descontando o custo de operação e manutenção (O&M) do sistema, considerado de 1% ao ano sobre o valor de investimento, de acordo com Montenegro (2013); Pinho e Galdino (2014); e Nakabayashi (2014).

Segundo Brigham e Houston (1999), o VPL é a diferença entre a soma dos benefícios (fluxo de caixa descontado) gerados pelo projeto, subtraído pelo valor inicial investido, conforme mostra a Equação 1.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \left(\frac{Fct}{(1+r)^t} - I0 \right) \quad (1)$$

Onde:

Fct: é o fluxo de caixa descontado no período t

r: é a taxa de desconto

I0: é o investimento inicial do sistema

n: é a vida útil do projeto

Os ganhos gerados pelo SFCR do campus correspondem à economia financeira anual, tanto pelo consumo direto da energia produzida pelo mesmo como pelo crédito financeiro gerado devido à injeção de energia excedente na rede pública. A taxa de desconto (r) foi projetada considerando a média da variação da taxa do Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (SELIC) nos últimos 10 anos, de acordo com dados da Receita Federal (2020).

A TIR é a taxa de desconto que iguala o valor presente das entradas de caixa esperadas de um projeto ao valor presente dos custos esperados do projeto, ou seja, é a taxa que iguala o VPL a zero, conforme Brigham e Houston (1999). A Equação 2 demonstra a relação da TIR com o VPL.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{Fct}{(1+TIR)^t} \quad (2)$$

Fct : é o fluxo de caixa descontado no período t

TIR : é a taxa interna de retorno

IO : é o investimento inicial do sistema

n : é a vida útil do projeto

Cálculo do CO₂ evitado: O cálculo da emissão evitada de CO₂ pela operação do sistema foi realizado com base na metodologia proposta em *Tool to calculate the emission factor for an electricity system*, criada pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima no ano de 2007, com base no Protocolo de Kyoto de 1997, o qual o Brasil ratifica. Conforme o Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC, 2020a), os projetos que ofertam energia elétrica para a rede ou que reduzem ou eliminam o consumo de energia da rede devem utilizar o fator de emissão de CO₂ associado à rede para calcular as reduções obtidas com a implantação do projeto. Ainda de acordo com o Ministério, o fator de emissão é uma combinação do fator de emissão da margem de operação, que reflete a intensidade das emissões de CO₂ geradas pelas usinas em operação no Sistema Interligado Nacional (SIN), com o fator de emissão da margem de construção, que reflete a intensidade das emissões de CO₂ das últimas usinas construídas.

De acordo com a metodologia *Tool to calculate the emission factor for an electricity system* (UNFCCC, 2007), deve-se atribuir pesos para os fatores de emissão em cada margem, sendo de 75% para a margem de operação, e 25% para a margem de construção, para que se tenha o chamado fator de emissão combinado. Ambos os fatores são disponibilizados no website do MCTIC. A Equação 3 demonstra o cálculo do fator de emissão combinado para o respectivo ano.

$$FC = (Fmo \times 0,75) + (Fmc \times 0,25) \quad (3)$$

FC : é o fator de emissão combinado a ser calculado

Fmo : é o fator de emissão da margem de operação do SIN

Fmc : é o fator de emissão da margem de construção do SIN

Portanto, multiplica-se a produção de energia do sistema fotovoltaico pelo fator de emissão combinado do respectivo ano, conforme a Equação 4.

$$CO2E = E \times FC \quad (4)$$

$CO2E$: é a quantidade de CO₂ evitado a ser calculado em toneladas

E : é a quantidade de energia produzida pelo sistema fotovoltaico em MWh

FC : é o fator de emissão combinado do SIN em toneladas por MWh

RESULTADOS

Produção de energia do sistema e atendimento ao consumo do campus

Após coleta dos dados gerados pelo *software* Sunny do sistema, foi possível verificar a quantidade de energia elétrica gerada pelo mesmo. A Figura 2 apresenta o gráfico de produção anual do sistema a partir do início de sua implantação em junho de 2016 até maio de 2020.

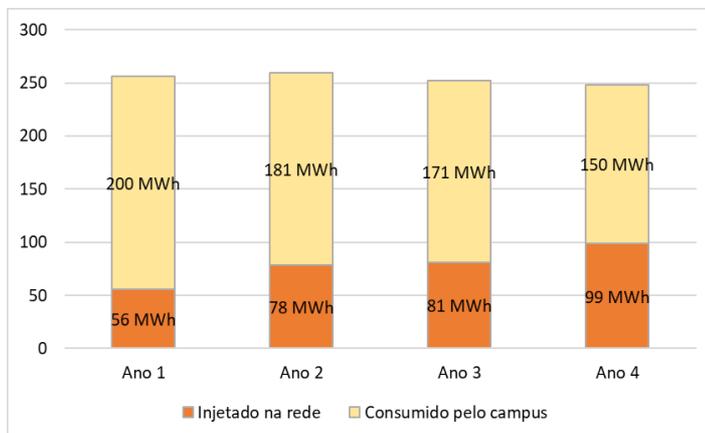


Figura 2: Produção anual de energia elétrica pelo sistema (em MWh)

Percebe-se na Figura 2, que há pouca diferença quanto à produção nesses últimos 4 anos, no entanto, e vale destacar, que o ano 2 foi o período de maior rendimento do SFCR, o que pode estar relacionado à quantidade de insolação diária, que de acordo com dados do INMET (2020), foi maior nesse período. Em 4 anos, a média anual de produção pelo SFCR foi de 254 MWh, totalizando no período 1.016 MWh. A produtividade anual média foi de 1.693 kWh/kWp. Do total produzido no período de 4 anos, 70%, foram consumidos diretamente pelo campus, e o restante, 30%, foram injetados na rede pública. Essa energia injetada foi produzida essencialmente em domingo, feriados e férias acadêmicas, quando a produção do sistema é maior que o consumo do campus. Lima et al. (2017) monitoraram o desempenho de um SFCR com 2,2 kWp de potência, instalado na Universidade Federal do Ceará, na cidade de Fortaleza, que é situada na mesma região da cidade de Floriano, entre os anos de 2013 e 2014. Nesse estudo, foi demonstrado que no período de 12 meses o sistema produziu 3.708,2 kWh, sendo a média mensal de 309 kWh e produtividade de 1.685,5 kWh/kWp. Os autores concluem que os resultados de desempenho mostram o bom potencial de produzir eletricidade através de energia solar fotovoltaica no Estado do Ceará.

Com base na produção dos 4 primeiros anos de operação, foi possível estimar a produção (em MWh) pelos próximos 25 anos (tempo de vida útil estimado pelo fabricante), considerando a perda gradativa de produção dos módulos de 0,5% ao ano, conforme demonstra a Figura 3.

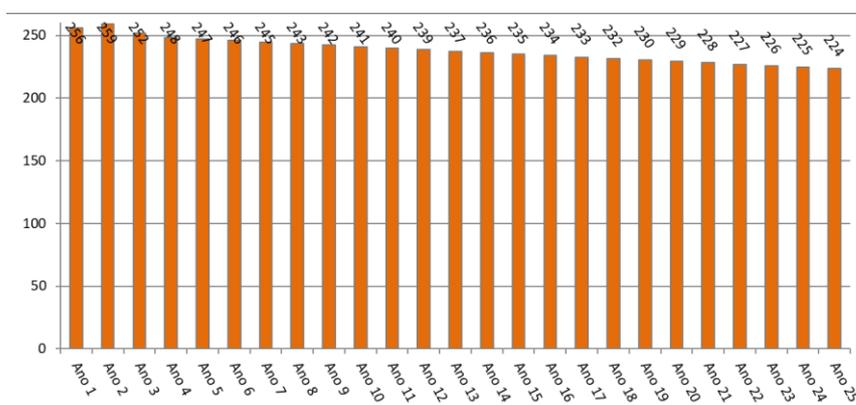


Figura 3: Estimativa de produção em MWh do SFCR do campus durante a vida útil

A estimativa é que até o final de sua vida útil (25 anos), estima-se que o sistema terá gerado 5.955.

MWh. Ressalta-se que os primeiros 4 anos apresentam dados consolidados. De acordo com Chandel et al. (2015), os módulos fotovoltaicos são propensos à degradação devido à umidade, temperatura e radiação solar, e que durante a exposição prolongada ao ar livre, a eficiência de um módulo fotovoltaico solar diminui continuamente, porque seus componentes envelhecem. Segundo os autores, a degradação do módulo afeta a produção de energia e, portanto, tem um impacto no desempenho dos sistemas, que devem operar de forma confiável por 20 a 25 anos. No entanto, Olalla et al. (2016) afirmam que dependendo da forma de instalação e condições ambientais, os módulos fotovoltaicos podem ter vida útil até maior que 25 anos.

O consumo de energia foi verificado através da análise das contas emitidas pela empresa concessionária de energia e pelo *software* Sunny do sistema. A Figura 4 demonstra a quantidade de energia consumida anualmente no campus.

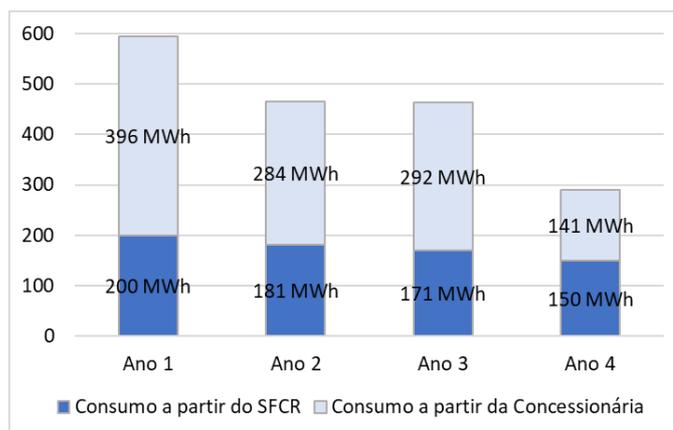


Figura 4: Consumo de energia elétrica do campus nos 4 anos de operação do SFCR (em MWh)

Pelo exposto na Figura 4, percebe-se que durante o ano 1 houve o maior consumo de energia. A partir do ano 2 foram tomadas medidas para economia de energia, como substituição de lâmpadas fluorescentes convencionais para as de LED, como também a troca de ares-condicionados do tipo split por mais modernos do tipo inverter. A quantidade de energia elétrica consumida pelo campus no período foi de 1.814 MWh, e desse montante, 701 MWh foi fornecido pelo SFCR o que corresponde a 39% do total consumido.

Observa-se que o ano 4 apresentou menor consumo, sendo menos da metade do ano 1. Isto se deve ao fato de que neste período foram implantadas medidas rígidas para redução do consumo de energia no intuito de adequar a Instituição ao corte orçamentário estipulado pelo governo federal às instituições de ensino federal. As medidas implantadas foram o desligamento dos ares-condicionados em determinados horários e campanhas de conscientização. Outro fato que explica o baixo consumo de energia, foi a suspensão das atividades presenciais do IFPI pela Reitoria em março de 2020, devido à pandemia do Novo Coronavírus (Covid-19).

Retorno Financeiro

Para a projeção do retorno financeiro do sistema ao longo da sua vida útil, foi realizada primeiramente uma análise dos ganhos nos primeiros 4 anos de operação do SFCR. A Tabela 1 trata da economia financeira e está diretamente relacionada à Figura 2, que demonstra a produção mensal de eletricidade do SFCR.

Como é possível observar na Tabela 1, o valor economizado com o consumo direto da energia gerada no sistema foi mais de R\$ 300.000 e de créditos quase R\$ 143.000, perfazendo um total exato de R\$ 443.742 nos primeiros 4 anos de operação do SFCR, o que equivale a uma média de R\$ 110.935 por ano. É importante ressaltar que no ano de 2015, o Conselho Nacional da Política Fazendária -

Ministério da Fazenda (CONFAZ), através da Norma de Ajuste SINIEF 2, de 2015, delegou a cada estado brasileiro a decisão de tributar a energia solar que é injetada na rede da distribuidora. O Estado do Piauí aderiu a esse ajuste somente a partir de outubro de 2016. Até então, o valor da tarifa de energia injetada era inferior à tarifa de energia consumida.

Período	Economia pelo consumo direto SFCR	Crédito gerado pelo SFCR	Economia anual
Ano 1	R\$ 67.329	R\$ 17.755	R\$ 85.084
Ano 2	R\$ 76.496	R\$ 32.021	R\$ 108.517
Ano 3	R\$ 85.172	R\$ 40.693	R\$ 125.865
Ano 4	R\$ 71.817	R\$ 52.458	R\$ 124.276
TOTAL	R\$ 300.814	R\$ 142.928	R\$ 443.742

Tabela 1: Economia financeira gerada pelo SFCR nos primeiros 4 anos de operação

A Tabela 2 detalha a projeção dos fluxos de caixa no período de vida útil do sistema. A coluna “ganho anual bruto” representa os ganhos através de custos evitados de energia elétrica projetados com base na produção do primeiro ano do sistema, considerando a perda gradativa de produção de 0,5% ao ano e o aumento na tarifa de energia de 9,69% ao ano, que corresponde ao reajuste médio da empresa concessionária de energia dos últimos 10 anos, de acordo com a ANEEL (2020).

Ano (t)	Ganho anual bruto	Fluxo de caixa com custo de O&M	Fluxo de caixa descontado (Fct)	Valor Presente Líquido (VPL)
0		-R\$ 1.150.500	-R\$ 1.150.500	-R\$ 1.150.500
1	R\$ 85.084	R\$ 85.084	R\$ 75.604	-R\$ 1.074.896
2	R\$ 108.517	R\$ 108.517	R\$ 94.043	-R\$ 980.853
3	R\$ 125.865	R\$ 125.865	R\$ 105.142	-R\$ 875.711
4	R\$ 124.276	R\$ 124.276	R\$ 103.182	-R\$ 772.529
5	R\$ 121.415	R\$ 110.179	R\$ 70.213	-R\$ 702.316
6	R\$ 132.514	R\$ 121.278	R\$ 70.626	-R\$ 631.690
7	R\$ 144.628	R\$ 133.392	R\$ 70.987	-R\$ 560.703
8	R\$ 157.850	R\$ 146.614	R\$ 71.299	-R\$ 489.404
9	R\$ 172.279	R\$ 161.043	R\$ 71.567	-R\$ 417.837
10	R\$ 188.028	R\$ 176.792	R\$ 71.796	-R\$ 346.041
11	R\$ 205.217	R\$ 193.981	R\$ 71.988	-R\$ 274.053
12	R\$ 223.977	R\$ 212.741	R\$ 72.146	-R\$ 201.907
13	R\$ 244.452	R\$ 233.216	R\$ 72.275	-R\$ 129.632
14	R\$ 266.799	R\$ 255.563	R\$ 72.375	-R\$ 57.257
15	R\$ 291.188	R\$ 279.952	R\$ 72.450	R\$ 15.193
16	R\$ 317.808	R\$ 306.572	R\$ 72.502	R\$ 87.695
17	R\$ 346.860	R\$ 335.624	R\$ 72.533	R\$ 160.227
18	R\$ 378.569	R\$ 367.333	R\$ 72.544	R\$ 232.772
19	R\$ 413.176	R\$ 401.940	R\$ 72.539	R\$ 305.310
20	R\$ 450.946	R\$ 439.710	R\$ 72.517	R\$ 377.827
21	R\$ 492.170	R\$ 480.934	R\$ 72.480	R\$ 450.308
22	R\$ 537.162	R\$ 525.926	R\$ 72.431	R\$ 522.739
23	R\$ 586.267	R\$ 575.031	R\$ 72.369	R\$ 595.108
24	R\$ 639.860	R\$ 628.624	R\$ 72.297	R\$ 667.404
25	R\$ 698.354	R\$ 687.118	R\$ 72.214	R\$ 739.618

Tabela 2: Fluxos de caixa projetados e respectivos VPL

A coluna “Fluxo de caixa com custo de O&M” demonstra os ganhos considerando os gastos com operação e manutenção (O&M) de 1% ao ano sobre o valor do investimento inicial sobre o sistema (módulos, inversores, cabeamento e equipamentos em geral), não incidindo esse percentual sobre o que foi gasto em elaboração do projeto técnico, portanto, um valor de desconto fixo de R\$ 11.236. Quando do período de análise econômica do sistema, não foi identificado gastos com O&M.

Na coluna “Fluxo de caixa descontado” aplicou-se a Equação 1 numa planilha para determinar o Valor Presente Líquido (VPL) na coluna seguinte, considerando a taxa de desconto (r) de 9,43% ao ano, que corresponde à taxa anual de juros equivalente ao referencial do Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (SELIC) dos últimos 10 anos, com base nos dados da Receita Federal (2020). Ressalta-se que os fluxos de caixa descontados nos primeiros 4 anos são valores consolidados com a taxa de juros do respectivo ano, logo, as projeções de fluxo de caixa foram calculadas para os anos seguintes.

Pelo exposto na Tabela 2, nota-se que o VPL é de R\$ 739.618 que representa o lucro gerado pelo sistema ao final dos 25 anos. De acordo com Brigham e Houston (1999), se um projeto tem o VPL positivo, então ele está gerando mais caixa do que é necessário para o pagamento da sua dívida. Segundo Nakabayashi (2014), os projetos onde o VPL for positivo são os considerados economicamente viáveis.

Na Tabela de fluxos de caixa é possível identificar o *payback* (tempo de retorno de investimento) de 15 anos, que representa o período em que os benefícios do sistema terão superado o valor do seu investimento. Vieira et al. (2016), ao analisarem os aspectos econômicos baseados na regulação brasileira sobre energia elétrica, afirmam que para sistemas em que a compensação de energia é realizada no próprio local de geração, o *payback* estimado é de 12 a 14 anos em alguns estados da região nordeste, como o Piauí. A Taxa Interna de Retorno (TIR) encontrada, aplicando a Equação 2, foi de 14%, que é maior que a taxa de desconto, logo significa que o sistema tem rentabilidade anual maior que a taxa de desconto estipulada (9,43%). Consoante Montenegro (2013), para que o investimento seja viável, é necessário que o VPL ao final de 25 anos seja positivo, o que, por consequência, leva também a resultados de TIR acima da taxa de desconto (taxa de anual de juros) e a um tempo de retorno do investimento inferior a 25 anos.

Dessa forma os sistemas fotovoltaicos devem ser aplicados de maneira adequada em relação a viabilidade técnica, custo do investimento e tarifa para que seja possível a rentabilidade econômica (Scarabelot et al, 2018).

CO₂ evitado com a operação do sistema

O cálculo do CO₂ evitado foi realizado somente para o primeiro ano de operação do sistema, pois não é possível fazer uma projeção segura para os anos seguintes, devido à incerteza quanto aos fatores de emissão. A Figura 5 mostra os fatores de emissão das margens de operação e construção divulgados pelo MCTIC (2020b) no decorrer dos anos e os fatores de emissão combinados após aplicação da Equação 3. Nota-se na Figura 5, a variação dos fatores de emissão, os quais dependem de como procede a geração de energia elétrica no país em determinado período. Consoante Buiatti et al. (2016), o fator de emissão do SIN é uma variável dependente de fatores climáticos, uma vez que a menor disponibilidade de água nos reservatórios das hidroelétricas demandar maior geração por termoelétricas a gás natural.

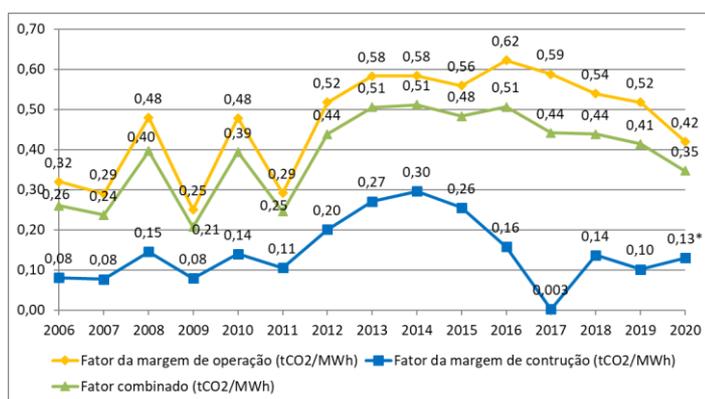


Figura 5: Fatores de emissão do SIN no decorrer dos anos (tCO₂/MWh). *O fator da margem de construção de 2020 ainda não foi disponibilizado pelo MCTIC, logo foi adotada uma média dos últimos anos.

Para calcular o CO₂ evitado do primeiro ano de operação do SFCR do campus, foram utilizados os fatores de emissão dos períodos: ano 1 (junho 2016-maio 2017); ano 2 (junho 2017-maio 2018); ano 3 (junho 2018-maio 2019); e ano 4 (junho 2019-maio 2020), e a produção energética do SFCR nesses respectivos períodos. Após ser aplicada a Equação 4, os resultados são demonstrados na Tabela 3. É possível observar que a quantidade de CO₂ evitado decresceu no decorrer dos anos, isso se deve ao fato da diminuição dos fatores de emissão. O total de CO₂ evitado para a atmosfera no período foi de 442 toneladas, o que corresponde aproximadamente a 37% das emissões evitadas pelas instituições de ensino no Estado do Piauí, as quais evitaram juntas um total de 1.188,74³ toneladas nesse período de 4 anos.

Período / ano	Energia produzida pelo SFCR (MWh)	Fator de emissão combinado (ton/MWh)	CO ₂ evitado por ano (ton)	Total de CO ₂ evitado (ton)
Ano 1 jun-dez 2016	159,52	0,51	81,36	123,80
jan-mai 2017	96,47	0,44	42,45	
Ano 2 jun-dez 2017	161,15	0,44	70,91	114,14
jan-mai 2018	98,26	0,44	43,24	
Ano 3 jun-dez 2018	151,27	0,44	66,56	107,76
jan-mai 2019	100,48	0,41	41,20	
Ano 4 jun-dez 2019	155,65	0,41	63,82	96,29
jan-mai 2020	92,77	0,35	32,47	
TOTAL			442 ton	

Tabela 3: Quantidade de CO₂ evitado pela operação do SFCR do campus Floriano

Considerando a estimativa de produção do SFCR apresentado na Figura 3, foi possível projetar a quantidade de CO₂ evitado durante o restante da vida útil do sistema (25 anos). Aplicando a Equação 4 em que o Fator de emissão combinado (Fc) é a média dos últimos 5 anos, estima-se uma economia de CO₂ para a atmosfera de aproximadamente 2.122 toneladas no total.

Consoante Krakauer (2014), investimento em energia renovável tem o duplo benefício de reduzir os danos causados pelas mudanças climáticas e colocar a economia mundial em uma base mais sustentável para o crescimento contínuo da produção. Em complemento, Spirovski et al. (2012) concluem que uma das maneiras mais eficazes de reduzir as emissões de GEE é por meio da mudança de hábitos e comportamentos que consomem energia.

³ Cálculo estimado de acordo com Melo (2018).

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo geral realizar uma análise do sistema de energia solar fotovoltaica do IFPI campus Floriano, abordando aspectos ambientais e econômicos. Assim, foi realizado um levantamento da produção de energia, ganhos econômicos, e CO₂ evitado nos 4 anos de operação do sistema. Uma possível ampliação do SFCR requererá mais investimento, logo, uma análise prévia de retorno financeiro será de suma importância, a fim de verificar seu custo benefício. Tratando-se do aspecto econômico, mesmo o tempo de retorno de investimento identificado ser alto (15 anos), o sistema possui viabilidade econômica, atestada pela verificação do critério Valor Presente Líquido, em que foi encontrado o montante de R\$ 739.618, que representa o ganho financeiro líquido ao final da sua vida útil. Devido à variabilidade dos fatores de emissão todos os anos, estes que dependem de uma série de parâmetros climáticos, não é seguro estimar as emissões evitadas futuramente. A quantidade de CO₂ evitado pelo sistema no período, que foi de 442 toneladas, é um valor expressivo, visto que esse sistema é um dos poucos existentes desse porte frente ao panorama da geração distribuída do Estado onde está situado o campus.

Recomenda-se a continuidade do monitoramento dos ganhos com economia e dos custos de operação e manutenção, a fim de se dispor de dados contínuos e mais precisos quanto à abordagem econômica. Para aprofundar a abordagem ambiental da energia solar, pode ser feito um estudo de avaliação do ciclo de vida do SFCR, no intuito de mensurar os possíveis impactos ambientais resultantes da fabricação e utilização do sistema. É importante também salientar que a Instituição tenha ciência do passivo ambiental que pode ser gerado quando do descarte dos módulos fotovoltaicos no fim da sua vida útil, e mesmo que isso venha a acontecer numa escala considerável de tempo, faz-se necessário que a Instituição planeje num futuro razoável, o destino ambientalmente adequado desse material.

REFERÊNCIAS

- Acikgoz, C. (2011). Renewable energy education in Turkey. *Renewable Energy*, 36, 2, 608-611. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811000385X?via%3Dihub>>. Consulta em: 11 nov. 2019.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. (2017). Nota técnica 056 de 24 de maio de 2017. Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024. <<https://www.aneel.gov.br>>. Consulta em: 21 abr. 2020.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. (2020). Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição. <<https://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>>. Consulta em: 5 jun. 2020.
- BCB - Banco Central do Brasil. (2020). Conversor de moedas. <www.bcb.gov.br/conversao>. Consulta em: 16/10/2020.
- Brigham, E. F.; Houston, J. F. (1999). Fundamentos da moderna administração financeira. Campus, Rio de Janeiro.
- Buiatti, G. M.; Andrade, R. L.; Amaral, P. C.; Rymer, J. V.; Fioranelli, C. O. S. (2016). Metodologia para estimativa de redução de emissões de CO₂ aplicada a sistemas de microgeração fotovoltaica In: Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belo Horizonte. 4-7 de abr. <<http://www.abens.org.br/CBENS2016/anais/anais/index.htm>>. Consulta em: 12 jan. 2018.
- Chandel, S.; Naik, M. N.; Chandel, R. (2015). Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1084-1099. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.083>>. Consulta em: 2 out. 2018.
- Friman, H. (2017). New Trends in the Higher Education: Renewable Energy at the Faculty of Electrical Engineering. *Energy Procedia*, 115, 18-28. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217322026>>. Consulta em: 27 ago. 2018.
- IFPI - Instituto Federal do Piauí. Campus Floriano instala sistema de energia solar. (2016). <https://www5.ifpi.edu.br/index.php?option=com_contentview=articleid=7511>. Consulta em: 25 nov. 2017.

- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia (2020). Dados meteorológicos. <<http://www.inmet.gov.br>>. Consulta em: 14 mai. 2020.
- Krakauer, N. (2014). Economic growth assumptions in climate and energy policy. *Sustainability*, 6, 3, 1448-1461. <<https://www.mdpi.com/2071-1050/6/3/1448>>. Consulta em: 23 ago. 2018.
- Lima, L. C.; Ferreira, L. A.; Morais, F. H. B. L. (2017). Performance analysis of a grid connected photovoltaic system in northeastern Brazil. *Energy for Sustainable Development*, 37, 79-85, abr. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082616308742?via%3Dihub>>. Consulta em: 10 out. 2018.
- Miller, G. T.; Spoolman, S. E. (2015). *Ciência ambiental*. Cengage Learning, São Paulo.
- MCTIC - Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. (2020a) Cálculo dos fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil. <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0019/19707.pdf>. Consulta em: 11 jul. 2020.
- MCTIC - Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Fatores de Emissão de CO₂ do Sistema Interligado Nacional do Brasil. (2020b). <http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_despacho.html>. Consulta em: 11 jul. 2020.
- Melo, M. L. S. Contribuição dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica para a redução de CO₂ no estado do Ceará. Fortaleza. Dissertação (Mestrado profissional em climatologia e aplicações nos países na CPLP e África) – UECE. <<https://siduece.uece.br/siduece/trabalhoAcademicoPublico.jsf?id=85203>>. Consulta em: 19/10/2020.
- MINISTÉRIO DA FAZENDA. (2015). Ajuste SINIEF nº 2, de 22 de abril de 2015. Dispõe sobre os procedimentos relativos às operações de circulação de energia elétrica, sujeitas a faturamento sob o sistema de compensação de energia elétrica de que trata a Resolução Normativa Nº 482, de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica. Diário Oficial da União. Brasília, DF, <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/ajustes/2015/AJ_002_15>. Consulta em: 18 out. 2017.
- Montenegro, A. A. (2013). Avaliação do retorno do investimento em sistemas fotovoltaicos integrados a residências unifamiliares urbanas no Brasil. Florianópolis. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – UFSC. <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/130917>>. Consulta em: 25 mar. 2018.
- Nakabayashi, R. K. (2015). Microgeração fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas futuras. São Paulo. Dissertação (Mestrado em Energia e Meio Ambiente) - USP. <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-26012015-141237/en.php>>. Consulta em: 25 nov. 2017.
- Olalla, C.; Maksimovic, D.; Deline, C.; Martinez-Salamero, L. (2017). Impact of distributed power electronics on the lifetime and reliability of PV systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25, 10, 821-835. <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ppp.2893>>. Consulta em: 14 set. 2018.
- Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Gonçalves, A. R.; Costa, R. S.; Lima, F. J. L.; Rütther, R.; Abreu, S. L.; Tiepolo, G. M.; Pereira, S. V.; Souza, J. G (Org.). (2017). Atlas brasileiro de energia solar. Elaborada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2. ed. São José dos Campos. <<http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas Brasileiro Energia Solar 2a Edicao.pdf>>. Consulta em: 16 mai. 2018.
- Pinho, J. T.; Galdino, M. A. (Org.). (2014). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Elaborada pelo – CRESESB. <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Consulta em: 5 out. 2016.
- Receita Federal. Taxa de juros SELIC. (2020). <<http://idg.receita.fazenda.gov.br/orientacao/tributaria/pagamentos-e-parcelamentos/taxa-de-juros-selic>>. Consulta em: 8 jun. 2020
- Reis, L. B.; Silveira, S. (2012). *Energia Elétrica para o Desenvolvimento Sustentável*. 2. ed. EDUSP, São Paulo.
- Rocha, L. C. S.; Aquila, G.; Pamplona, E. O.; Paiva, A.P.; Chierigatti, B. G.; Lima, J. S. B. (2017).

- Photovoltaic electricity production in Brazil: A stochastic economic viability analysis for small systems in the face of net metering and tax incentives. *Journal of Cleaner Production*, 168, 1448-1462. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617320061>>. Consulta em: 1 abr. 2018.
- Saez, V. e Garzon, B. (2019). Analisis de la huella de carbono en placa de revestimiento resueltas con scrap. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 23, 05.37-05.45. http://exporenovables.com.ar/2019/descargas/Revista_AVERMA_2019.pdf.
- Scarabelot, LT. Rampinelli, G. A. Rambo, C. R. (2018). Avaliação econômica e energética de unidades prosumidoras residenciais com sistemas fotovoltaicos em operação no sul do Brasil. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 22, pp 03.15-03.24. http://exporenovables.com.ar/2018/descargas/Revista_AVERMA_2018.pdf.
- Spirovski, D. Abazi, A.; Iljazi, I.; Ismaili, M.; Cassulo, G.; Venturin, A. Realization of a Low Emission University Campus Trough the Implementation of a Climate Action Plan. (2012). *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 46, 4695-4702. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812020575>>. Consulta em: 10 set. 2018.
- Tolmasquim, M. T. (Org.). (2016). Energia renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/livro-sobre-energia-renovavel-hidraulica-biomassa-eolica-solar-oceanica>>. Consulta em: 20 set. 2017
- UNFCCC - Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima. (2007). Tool to calculate the emission factor for an electricity system. <<https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-07-v6.pdf>>. Consulta em: 17 abr. 2018.
- Valadares, L. C. (2016). Memorial descritivo de Sistema de Minigeração Fotovoltaica conectado à rede elétrica com potência instalada de 150 kW em Floriano, PI (Campus IFPI). Alsol Energias Renováveis, Uberlândia.
- Vieira, D.; Shayani, R A.; Oliveira, M. A. G. (2016). Net Metering in Brazil: Regulation, Opportunities and Challenges. *IEEE Latin America Transactions*, 14, 8, 3687-3694. <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7786351/>>. Consulta em: 13 jun. 2018.

ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC APPROACH TO PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY INSTALLED IN A FEDERAL INSTITUTE OF EDUCATION IN BRAZIL

ABSTRACT: The present work seeks to analyze from the environmental and economic point of view, the photovoltaic system of the Floriano campus of the Federal Institute of Piauí, in Brazil. For that, a survey was carried out for the production during 4 years of operation of the system, the energy consumption of the campus, as well as the quantification of the avoided CO₂ emissions. It was verified that since its installation, the system produced a total of 1.016 MWh, covering 39% of the campus consumption. The savings in this period were BRL 443,742 (USD 86,500), generating a profit (net present value) of R\$ 739,618 (USD 144,175) at the system lifespan and it's estimated payback in 15 years. As for the environmental benefit, the campus avoided the emission of 442 tons of CO₂ into the atmosphere in the period analyzed. It was concluded that the investment made by the institution is economically viable, despite the high payback time. It is essential that the institution maintains its energy saving measures in order to reduce costs, as well as reducing its CO₂ emissions into the atmosphere. Furthermore, it is important that the Floriano campus plans the environmentally correct destination of the modules at the system lifespan.

KEYWORDS: Environmental and economic approach. Solar energy. Federal Institute.