

Technical-Economic Analysis of the First Mini-Generation Photovoltaic System of Piauí, Brazil

F. Morais, A. Moraes, and F. Barbosa

Abstract—The first distributed mini-generation photovoltaic system in the state of Piauí was installed on the Floriano *campus* of the Federal Institute of Piauí. The system consists of 660 photovoltaic modules and occupies an area of approximately 1.122 m² of roof. This article aims to evaluate the performance of the first year of operation, which runs from May 2016 to June 2017, compared to technical and economic aspects. The technical analysis was done through the calculation of the indexes of merit: Final Productivity Performance Rate and Capacity Factor. In the economic viability analysis were used the concepts of Net Present Value, Internal Rate of Return, Payback and Cost-Benefit Ratio. The results demonstrate that the system has technical feasibility, since it presented a good generation in its first year of operation, with production superior to other systems installed in public educational institutions of Brazil. In addition, it has shown a positive balance in the Net Present Value, but with a long Payback and a very high Cost-Benefit Ratio, which may compromise its economic viability. However, in view of the institution's final activity, the installation of the photovoltaic system will bring benefits beyond the reduction of electricity consumption, if used in teaching, research and extension activities.

Index Terms—Photovoltaic system, Operational performance, Economic evaluation.

I. INTRODUÇÃO

DURANTE as últimas décadas, os níveis crescentes da demanda de energia tornaram-se uma fonte de preocupação [1]. Por conta disso, as fontes renováveis de energia passaram a ter grande importância, tornando-se indispensáveis para o desenvolvimento de um sistema sustentável de geração de eletricidade [2]. Dentre as diversas fontes renováveis de energia, a solar fotovoltaica mostrou-se como uma das mais promissoras porque é a única tecnologia de geração de eletricidade que pode ser amplamente integrada aos diferentes tipos de edificações presentes no meio ambiente urbano. Além disso, as emissões de gases poluentes são muito menores do que as tecnologias convencionais de geração de eletricidade baseadas em combustíveis fósseis [3].

No Brasil, a energia solar fotovoltaica ainda é uma forma de energia pouco utilizada, considerando as propícias condições de irradiação solar do país. Inicialmente seu uso englobava, em sua maioria, sistemas isolados em pequena escala instalados em áreas sem conexão com o Sistema Interligado Nacional [4].

No entanto, a quantidade de instalação de sistemas de geração fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil veio a crescer nos últimos anos, principalmente após a publicação da Resolução Normativa nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que padronizou a inclusão da energia fotovoltaica na matriz energética brasileira [5]. A resolução permitiu aos consumidores brasileiros o direito de instalar sistemas fotovoltaicos, divididos em duas categorias: micro e mini geração distribuída. Foi um marco no setor energético brasileiro, pois colocou o Brasil no grupo de países que incentivaram e apoiaram a autoprodução de energia elétrica por cidadãos, empresas e instituições que desejam suprir seu consumo de energia a partir de sistemas fotovoltaicos operando em paralelismo com a rede elétrica [6]. Outro marco importante ocorreu em 2015, com a publicação da Resolução Normativa nº 687/2015 da ANEEL, que alterou a resolução anterior e estabeleceu condições e facilidades para a utilização da geração distribuída. Com esta atualização, a potência permitida para a micro geração, passou a ser de até 75 kW, e para a mini geração, entre 75 kW e 5 MW [7].

Como consequência destas ações regulatórias combinadas com os avanços na tecnologia fotovoltaica, verificou-se um aumento significativo da geração distribuída no Brasil, principalmente na área de sistemas conectados à rede elétrica [8]. A partir das regulamentações, a adoção de sistemas de geração própria no Brasil teve um início tímido, mas começou a se popularizar. Em 2016, houve um salto de mais de quatro vezes no número de instalações, terminando o ano com 81 MW instalados, distribuídos em 7,7 mil unidades [9]. Em 2016, a micro e a mini geração distribuída atingiram 359,15 GWh com uma potência instalada de 246,1 MW, com destaque para a fonte solar fotovoltaica, com 165,87 GWh e 174,5 MW de geração e potência instalada respectivamente [10].

Uma vez que a geração de energia fotovoltaica passa a desempenhar um papel crescente na produção de eletricidade, torna-se cada vez mais importante monitorar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos com o objetivo de avaliar a qualidade da operação durante seu ciclo de vida em termos de desempenho anual [11]. Avaliações precisas e consistentes do desempenho do sistema solar fotovoltaico são fundamentais para o desenvolvimento contínuo da indústria fotovoltaica. Para os fabricantes de componentes, as avaliações de desempenho são *benchmarks* de qualidade para produtos existentes. Para as equipes de pesquisa e desenvolvimento, são uma medida chave

F. H. M. Morais, é do Instituto Federal do Piauí, *Campus* Teresina Central, Teresina, PI, Brasil 64000-040 (e-mail: fabricio@ifpi.edu.br).

A. M. Moraes, é da Universidade Federal do Piauí, *Campus* Senador Helvídio Nunes, Picos, PI, Brasil, 64607-670 (e-mail: albemerc@ufpi.edu.br).

F. R. Barbosa é do Departamento de Engenharia Elétrica, *Campus* Ministro Petrônio Portela, Universidade Federal do Piauí, Teresina, P, Brasil 64049-550 (e-mail: fabiorocha@ufpi.edu.br).

para ajudar a identificar as necessidades futuras. Para integradores de sistemas e clientes finais, são ferramentas vitais para avaliar a qualidade de produtos para orientar a tomada de decisão futura [12].

Outro aspecto importante a ser analisado diz respeito à viabilidade econômica da instalação de sistemas fotovoltaicos. Em geral, a combinação de tarifas residenciais elevadas com alta disponibilidade de radiação solar, sugere que a eletricidade fotovoltaica possa atingir a viabilidade econômica para instalações de telhado conectadas à rede onde, neste caso, os custos de eletricidade gerada serão iguais ao preço de eletricidade de varejo [3]. Portanto, a análise da viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos é crucial para melhorar a absorção da tecnologia fotovoltaica, já que as políticas favoráveis para utilização de energias renováveis ainda se encontram em processo de evolução [13].

Assim, tendo em vista que a geração de energia elétrica através da tecnologia solar fotovoltaica tem muitas nuances a serem consideradas, faz-se necessário um estudo que envolva a análise global desta fonte para comprovar a viabilidade de instalação e expandir ainda mais a sua utilização. O primeiro sistema de mini geração distribuída do estado do Piauí a entrar em operação, foi instalado no *campus* Floriano do Instituto Federal do Piauí (IFPI) que está localizado no município de Floriano-PI, com as coordenadas geográficas Latitude $6^{\circ}47'21,18''$ Sul e longitude $43^{\circ}02'34,43''$ Oeste, e ocupa uma área de aproximadamente 1.122 m^2 do telhado do *campus*. Neste sentido, este trabalho apresenta os resultados decorrentes da avaliação de desempenho operacional deste sistema, tendo em vista o seu primeiro ano de operação, de junho de 2016 a maio de 2017, frente a aspectos técnicos e econômicos.

II. DESCRIÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

O sistema fotovoltaico instalado no *campus* Floriano do IFPI, denominado agora como Sistema IFPI-FLORIANO, é enquadrado como sistema de mini geração distribuída, de acordo com as resoluções normativas nº 482/2012 e nº 687/2015. É composto por 660 módulos fotovoltaicos Policristalinos de modelo *Canadian Solar CS6P-260P*, com potência de 260 W cada, totalizando uma potência instalada de 171,6 kWp. Os inversores utilizados são da marca SMA *Sunny Tripower*, modelos STP 10000TL (1), STP 15000TL (1) e STP 25000TL (5), totalizando, assim, 7 inversores.

O sistema é formado por cinco arranjos que estão divididos em dois subsistemas sendo um de 53,04 kWp formado pelos arranjos dos telhados 1, 2 e 3 (denominado Subsistema 1), e outro de 118,56 kWp composto pelos arranjos dos telhados 4N, 4S e 5 (denominado Subsistema 2), como pode ser visto na Fig. 1. O arranjo localizado no Telhado 1, contém 34 módulos, e é constituído de duas *strings* de 17 módulos, conectadas no inversor de 10 kW; no Telhado 2 tem-se um arranjo de 110 módulos, composto de três *strings* de 20 módulos e duas *strings* de 25 módulos conectadas no inversor de 25 kW; além desses, também está presente um arranjo de 60 módulos, no Telhado 3, com quatro *strings* de 15 módulos conectadas no inversor de 15 kW, perfazendo assim os 53,04 kWp do Subsistema 1. Já o Subsistema 2 é composto por dois arranjos de 228 módulos, localizados nos Telhados 4N, 4S e 5, distribuídos em 4 inversores de 25 kW, sendo 2 inversores por arranjo. Em cada

inversor são conectadas três *strings* de 22 módulos e duas *strings* de 24 módulos. O que perfaz um total de 118,56 kWp. Os módulos fotovoltaicos encontram-se montados sobre estrutura metálica fixa com inclinação de 15° , orientada para o Nordeste (desvio azimutal de 5°) nos telhados 1, 2, 3 e 4N e orientada para o Sudoeste (desvio azimutal de -175°) nos telhados 4S e 5 [14].



Fig. 1. Disposição dos módulos fotovoltaicos sobre o telhado do *campus* Floriano do IFPI.

III. ANÁLISE DE DESEMPENHO OPERACIONAL

Os parâmetros básicos para o monitoramento e análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos, conhecidos como índices de mérito, são estabelecidos na norma IEC 61724. A determinação destes índices se faz importante porque através dela se pode comparar instalações fotovoltaicas de diferentes tamanhos, operando em climas diferentes e fornecendo energia para diferentes usos [15].

Alguns dos parâmetros presentes na norma podem ser usados para definir o desempenho geral do sistema em relação à produção de energia, ao recurso solar e ao efeito geral das perdas do sistema, que são a Produtividade Final e a Taxa de Desempenho [12]. A Produtividade Final, Y_f (dada em kWh/kWp), é definida como o fluxo de energia líquido diário, mensal ou anual de todo o sistema, dividida pela potência de pico do gerador fotovoltaico [16] e pode ser encontrada por meio da Eq. 1, em que $P(t)$ é a potência instantânea gerada pelo sistema, P_0 é a potência nominal da unidade geradora e E é a energia entregue pelo sistema em um determinado período de tempo ($t_2 - t_1$).

$$Y_f = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt}{P_0} = \frac{E}{P_0} \quad (1)$$

A Taxa de Desempenho, PR , do inglês *Performance Ratio*, também chamada de Desempenho Médio Global, é um índice adimensional que leva em consideração a quantidade líquida de energia diária, mensal ou anual produzida por um sistema fotovoltaico em condições reais de trabalho em relação à energia teórica de entrada do sistema. Assim, em termos simples, quanto maior a PR maior a quantidade de energia solar que é convertida em energia elétrica [11]. A PR é determinada

pela divisão da Produtividade Final, Y_f , pela Produtividade de Referência Y_r , como pode ser visto na Eq. 2.

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (2)$$

A Produtividade de Referência, Y_r , pode ser calculada utilizando a relação entre a irradiação total no plano do arranjo $H_{t,\beta}$ (dada em kWh/m²), em um determinado período, pela irradiação de referência G_{ref} , que nas condições padrão de teste (G_{STC}) vale 1.000 W/m² como pode ser visto na Eq. 3. Este índice também é chamado de Número de Horas de Sol Pleno, pois representa a duração do tempo durante o qual a radiação solar monitorada está no nível de irradiação de referência [17,18].

$$Y_r = \frac{\int_{t_1}^{t_2} G_{\beta}(t) dt}{G_{ref}} = \frac{H_{t,\beta}}{G_{STC}} \quad (3)$$

O Fator de Capacidade, CF , é um índice de mérito geralmente utilizado em usinas de geração de energia elétrica. Representa o nível de atividade de um sistema de geração, em um determinado período, através da relação entre a energia efetivamente produzida e a produção que teria, funcionando em sua capacidade nominal durante esse mesmo período [19] e pode ser calculado através da Eq. 4.

$$CF = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt}{P_0 \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{E}{P_0 \cdot (t_2 - t_1)} \quad (4)$$

IV. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A viabilidade econômica de um projeto pode ser determinada mediante uma perspectiva quantitativa (numérica) ou de uma perspectiva qualitativa (não-numérica). Na perspectiva qualitativa, a decisão de investir em um projeto decorre da manifestação de interesse de uma pessoa ou de um grupo sem, necessariamente, considerar os custos e benefícios da implantação. Já na análise quantitativa, deve-se projetar um fluxo de caixa que apresente as entradas e saídas e capital e sua periodicidade. A partir de então, analisar e argumentar sobre a aderência estratégica do projeto ao indicar se o projeto foi desenvolvido para atender ou não às estratégias do plano da entidade, em especial os de longo prazo e, conseqüentemente, está alinhado a sua missão e visão. Além disso, fazer a análise econômica financeira com a apuração de métricas próprias das análises de Engenharia Econômica [20].

O Valor Presente Líquido (VPL) dos investimentos, nada mais é do que a diferença entre os benefícios gerados pelo projeto e seus custos, onde os fluxos de caixa são trazidos a um valor presente descontados a uma determinada taxa. Se o VPL for positivo, as receitas do projeto superam o valor investido somado às despesas do projeto, caso em que é considerado economicamente viável [19]. A expressão para o cálculo do VPL é mostrada na Eq. 5, em que F_{ct} é o fluxo de caixa no período t considerado, r é a taxa de desconto, n é o horizonte de vida útil do projeto e I_0 é o investimento inicial.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{F_{ct}}{(1+r)^t} - I_0 \quad (5)$$

A Taxa Interna de Retorno (TIR) em suma é uma taxa intrínseca do projeto e, dependendo apenas dos fluxos de caixa projetados, é a taxa que remunera o investimento. Se a TIR for maior do que a Taxa de Desconto, o projeto pode ser aceito [21]. Do ponto de vista matemático, a TIR é a taxa em que, empregada como a taxa de desconto no cálculo do VPL faz com que seu valor fique igual a zero, ou seja, é a raiz da função VPL, onde a variável independente é a taxa de desconto. Eq. 6 demonstra a relação entre a TIR e o VPL.

$$VPL = \frac{F_{c1}}{(1+TIR)^1} + \dots + \frac{F_{cn}}{(1+TIR)^n} - I_0 = 0 \quad (6)$$

O tempo de retorno de um investimento, ou *Payback* (PB), é número de períodos necessários para que o fluxo de caixa acumulado se torne positivo, isto considerando que este fluxo é do tipo em que o investimento é realizado no primeiro período e as receitas estão nos anos seguintes [19]. Pode ser calculado por meio da Eq.7, em que R_e são as receitas fixas obtidas em um determinado período fixo que pode ser semanal, mensal, anual ou outro intervalo de interesse.

$$PB = \frac{I_0}{R_e} \quad (7)$$

A Relação Custo Benefício (RCB) pode ser determinada através da Eq. 8. Esse indicador serve para selecionar entre vários projetos quando o capital é limitado. Devem ser escolhidos projetos que apresentem uma relação menor que um (quanto menor a RCB, melhor). Quando não houver a limitação de capital, deve-se investir em todos os projetos que obtiverem um VPL positivo [21].

$$RCB = \frac{I_0}{VPL} \quad (8)$$

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Fig.2 pode ser vista a geração mensal do Sistema IFPI-FLORIANO no seu primeiro ano de operação, composta pela produção do subsistema 1 (53,04 kWp) e pela produção do subsistema 2 (118,56 kWp).

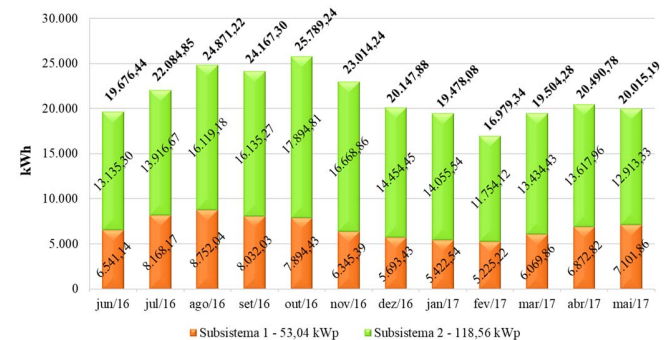


Fig. 2. Geração mensal do sistema fotovoltaico IFPI-FLORIANO no seu primeiro ano de operação.

O sistema gerou nesse período um total de 256.218,84 kWh, 82.118,93 kWh gerados pelo Subsistema 1, e 174.099,91 kWh gerados pelo Subsistema 2. Assim, a produção média mensal de todo o sistema foi de 21.351,57 kWh (14.508,33 kWh referentes ao subsistema 1 e 6.843,24 kWh referentes ao subsistema 2).

Vale a pena ressaltar que os valores foram obtidos utilizando o *software* de monitoramento Sunny, próprio dos inversores instalados.

A. Análise de Desempenho Operacional

Na Tabela I encontram-se descritos os valores mensais de Produtividade Final do sistema fotovoltaico. No primeiro ano de operação o subsistema 1 teve uma produtividade final de 1.548,25 kWh/kWp. Já a produtividade final do subsistema 2 foi de 1.468,45 kWh/kWp. Dessa maneira, a Produtividade Final do sistema foi de 1.493,12 kWh/kWp, obtida através da média ponderada entre os valores de produtividade final dos dois subsistemas, onde os pesos são suas potências de pico.

TABELA I
VALORES MENSIS DE PRODUTIVIDADE FINAL, EM KWH/KWP

Mês	Subsistema 1	Subsistema 2	Total Mensal
jun/16	123,32	110,79	114,66
jul/16	154,00	117,38	128,70
ago/16	165,01	135,96	144,94
set/16	151,43	136,09	140,84
out/16	148,84	150,93	150,29
nov/16	119,63	140,59	134,12
dez/16	107,34	121,92	117,41
jan/17	102,23	118,55	113,51
fev/17	98,51	99,14	98,95
mar/17	114,44	113,31	113,66
abr/17	129,58	114,86	119,41
mai/17	133,90	108,92	116,64
Total Anual	1548,25	1468,45	1493,12

Na Tabela II são mostrados os valores mensais de Fator de Capacidade do sistema fotovoltaico. Para o Subsistema 1, tem-se o valor de 17,67 % e para o Subsistema 2, 16,76 %. Dessa maneira, o Fator de Capacidade do sistema foi de 17,04 %.

TABELA II
VALORES MENSIS DE FATOR DE CAPACIDADE, EM %

Mês	Subsistema 1	Subsistema 2	Total Mensal
jun/16	17,13	15,39	15,93
jul/16	20,70	15,78	17,30
ago/16	22,18	18,27	19,48
set/16	21,03	18,90	19,56
out/16	20,01	20,29	20,20
nov/16	16,62	19,53	18,63
dez/16	14,43	16,39	15,78
jan/17	13,74	15,93	15,26
fev/17	14,66	14,75	14,72
mar/17	15,38	15,23	15,28
abr/17	18,00	15,95	16,58
mai/17	18,00	14,64	15,68
Total Anual	17,67	16,76	17,04

Tendo em vista a não existência dos equipamentos de monitoramento do recurso solar descritos na IEC 61724, para o cálculo da Taxa de Desempenho, os dados de irradiação solar foram obtidos a partir dos metadados da 2ª edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar [22]. A norma afirma que para a

obtenção dos valores de irradiação solar incidente no plano dos módulos devem ser realizadas medições, sendo que a irradiância deve ser obtida por meio de módulos de referência calibrados ou através de piranômetros. Os valores de irradiação solar global horizontal para a cidade de Floriano-PI encontram-se descritos na Fig. 3.

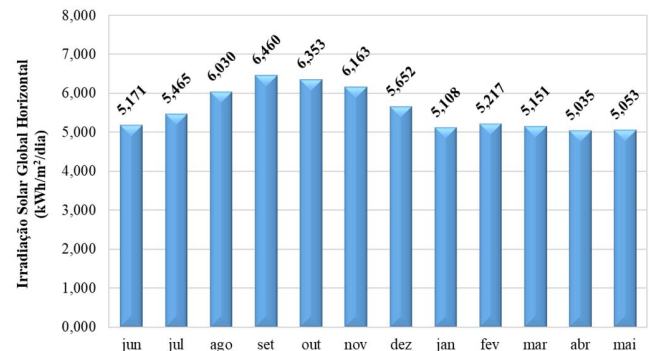


Fig. 3. Valores mensais de Irradiação Solar Global Horizontal para a cidade de Floriano PI.

Os valores da irradiação no plano dos Módulos fotovoltaicos foram obtidos por meio do *software* Radiasol [23], que realizou a conversão dos valores apresentados na Fig.3, considerando os desvios azimutais de cada telhado e a inclinação dos módulos fotovoltaicos. Os valores de irradiação encontrados estão descritos na Fig. 4.

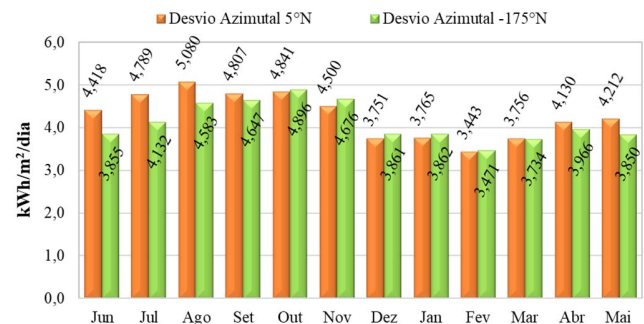


Fig. 4. Irradiação solar no plano dos módulos obtida no *software* Radiasol

Os valores mensais para a Taxa de Desempenho do sistema encontram-se descritos na Tabela V. O subsistema 1 fez um total anual de 73,47 % e o subsistema 2, um total anual de 73,57 %. Dessa maneira o Desempenho Global do sistema no seu primeiro ano de operação foi de 73,54 %.

Na Tabela IV pode ser visto um comparativo entre o Sistema IFPI-FLORIANO com outros sistemas, também instalados em instituições públicas de ensino de locais distintos do Brasil com relação aos seus índices de mérito. Gomes *et al* [24] apresentam os resultados referentes ao SFCR de 2,16 kWp que se encontra instalado nas dependências da Universidade Federal de Uberlândia (UFV NUPEP-FEELT-UFU). O sistema descrito por Junior *et al* [25] tem uma potência instalada de 2,1 kWp e encontra-se instalado no telhado do Escritório Verde da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), na cidade de Curitiba. Já o sistema descrito por Buiatti *et al* [26] instalado na Reitoria do Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN), localizada na cidade de Natal tem uma potência instalada total de 56,4 kWp.

TABELA III
VALORES MENSAIS DE TAXA DE DESEMPENHO, EM %

Mês	Subsistema 1	Subsistema 2	Total Mensal
jun/16	69,77	79,81	76,71
jul/16	75,96	75,25	75,47
ago/16	80,94	79,25	79,77
set/16	75,43	72,83	73,63
out/16	76,30	75,65	75,85
nov/16	75,27	72,40	73,29
dez/16	63,84	65,50	64,99
jan/17	66,16	71,79	70,05
fev/17	68,13	66,42	66,95
mar/17	70,80	71,10	71,01
abr/17	81,56	78,20	79,24
mai/17	77,48	74,60	75,49
Total Anual	73,47	73,57	73,54

TABELA IV
COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS INSTALADOS EM INSTITUIÇÕES PÚBLICAS DE ENSIN EM LOCAIS DISTINTOS DO BRASIL

Parâmetros	IFPI	UTFPR	UFU	IFRN
P_0 (kWp)	171,60	2,10	2,16	56,4
E (kWh)	256.218,84	2.444,00	3.077,11	92.964,00
Y_f (kWh/kWp)	1.493,12	1.163,81	1.454,21	1.648,31
CF (%)	17,04	13,25	16,26	18,82
PR (%)	73,54	65,98	69,18	85,24

Ao comparar os parâmetros de desempenho de todos os sistemas, o sistema IFPI-FLORIANO apresenta um desempenho operacional superior a praticamente todos eles. Nos casos do sistema instalado no Escritório Verde da UFTPR-CURITIBA e do sistema UFU-UBERLÂNDIA, isso se verifica pelo fato de estarem localizados em regiões do Brasil que recebem menores índices de radiação solar durante o ano, como pode ser visto na Fig. 5.



Fig. 5. Localização geográfica dos SFCR comparados [22].

Porém, no caso do sistema IFRN-NATAL, os valores dos parâmetros de desempenho apresentam-se maiores que os referentes ao sistema IFPI-FLORIANO. Ademais, analisando a Fig.5, percebe-se que os dois sistemas se situam em regiões do mapa que apresentam os mesmos índices de irradiação solar.

Dessa maneira, faz-se necessária a análise do mapa visto na Fig. 6, que apresenta índices de radiação solar da Região Nordeste do Brasil. Pode-se verificar que Floriano e Natal situam-se em zonas que apresentam índices de radiação solar distintos. Vale a pena ressaltar que esta região brasileira tem como principal característica, o elevado potencial anual médio de energia solar, aliado a uma baixa variabilidade interanual das médias de irradiação solar [27].

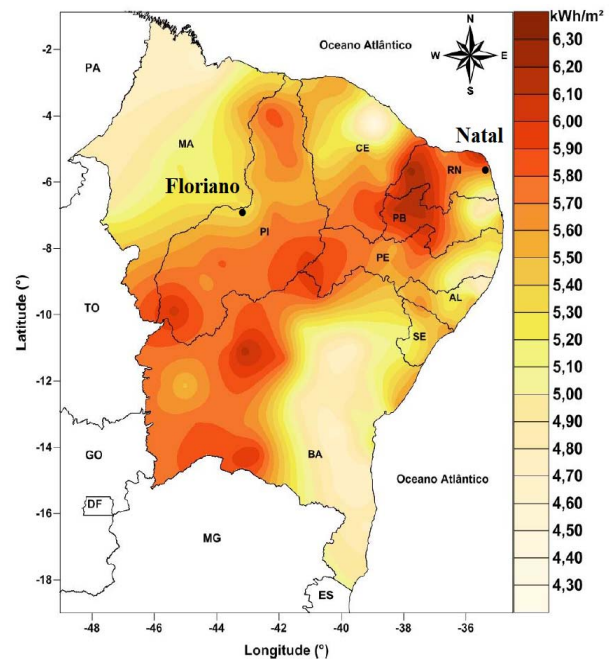


Fig. 6. Mapeamento da Irradiação Solar no Nordeste Brasileiro [28].

Acredita-se que pelo fato do sistema IFRN-NATAL estar instalado em uma região litorânea, o sistema fotovoltaico trabalhe em condições melhores de resfriamento, diminuindo assim as perdas por temperatura. Nessas regiões, os valores de velocidade do vento são bem maiores do que a maioria das regiões interioranas, caso do Sistema IFPI-FLORIANO. Isso pode ser visto na Fig. 7. que mostra a média da velocidade do vento para a cidade de Natal, e na Fig. 8, para a cidade de Floriano.

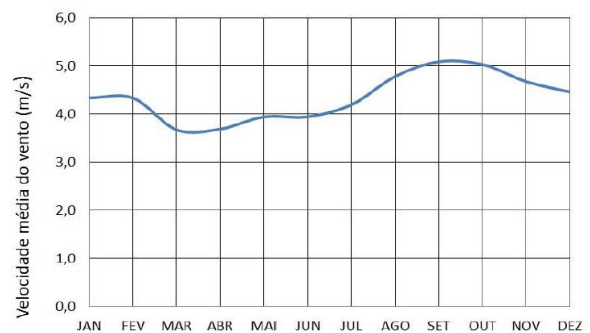


Fig. 7. Velocidade média do vento na cidade de Natal-RN [29].

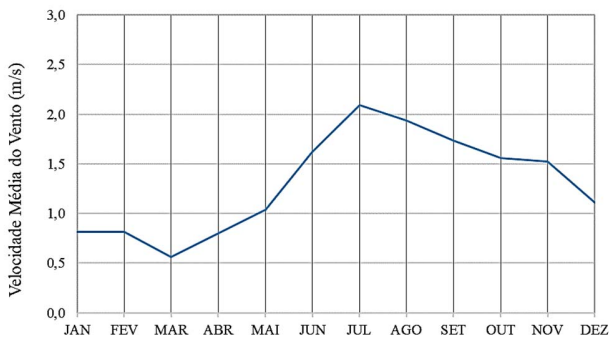


Fig. 8. Velocidade média do vento na cidade de Floriano-PI.

Vale a pena ressaltar que nos casos dos sistemas apresentados por [24] e [26], os cálculos foram feitos tendo como base os dados do Projeto SWERA – *Solar and Wind Energy Resource Assessment*. Já no caso do sistema descrito por [25], a PR foi calculada utilizando os índices de radiação fornecidos por uma estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), instalada próxima ao sistema fotovoltaico.

B. Análise de Viabilidade Econômica

Na análise econômica de um sistema fotovoltaico as entradas mais importantes do fluxo de caixa são o custo inicial do sistema e a quantidade de energia que será fornecida ao longo da sua vida útil [30]. Nesta pesquisa foi considerada a vida útil como sendo de 25 anos, tempo de garantia do módulo utilizado, contra perda de potência limitada a 80 % da sua capacidade original, dado pelo fabricante.

Foi considerado o investimento inicial de R\$ 1.150.000,00 para a aquisição do sistema, para atender parte da demanda do *campus* Floriano do IFPI, onde a potência foi limitada pela disponibilidade de telhado e recursos financeiros. A aquisição foi feita por meio de processo licitatório, referentes às fases de elaboração do projeto, fornecimento e instalação do sistema e treinamento de funcionários.

Como benefício gerado pelo projeto, foi considerado o valor de R\$ 0,331276/kWh a ser economizado nas faturas de energia, determinado pela média dos valores cobrados por cada kWh no horário fora-ponta para consumidores de grupo A4 faturados com a tarifa verde, em vigor no *campus* Floriano do IFPI no período analisado [31], descritos na Fig.9.

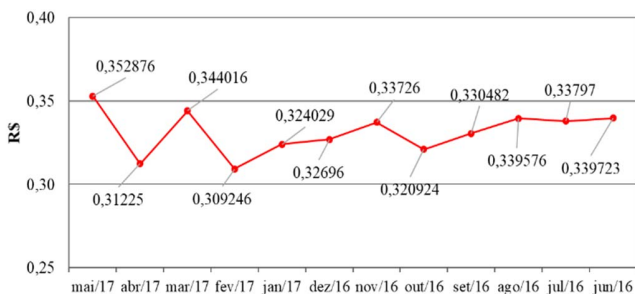


Fig. 9. Valores Tarifários cobrados pela concessionária, no período considerado [31].

Além disso, a determinação das métricas econômicas pressupõe a existência da projeção de um Fluxo de Caixa, que é a diferença entre as entradas e as saídas de capital em cada período, e a consideração de uma Taxa de Desconto [21].

Assim, foram considerados o custo da energia gerada pelo sistema, o investimento inicial, bem como a inflação e o reajuste anual da tarifa de energia elétrica. Nesta pesquisa, este parâmetro foi calculado através da diferença entre a média dos valores anuais da Taxa Selic e a média dos valores de reajuste anual das tarifas de energia informados pela Aneel, ambas observadas nos últimos dez anos [32,33], vistas na Fig. 10.

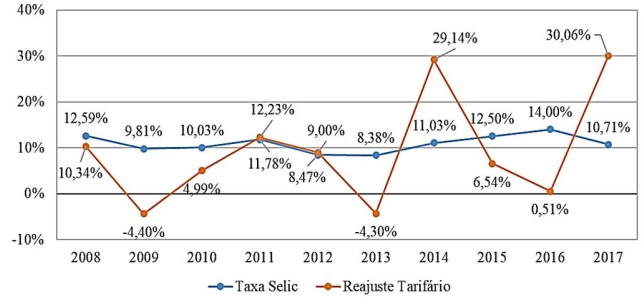


Fig. 10. Variação da Taxa Selic e do reajuste da Tarifa de Energia no Piauí, de 2008 a 2017 [32,33].

É comum utilizar uma taxa de depreciação na geração dos módulos fotovoltaicos ao longo do tempo. Geralmente a taxa é considerada nos modelos de projeção com valores de 0,5 % a 1 % ao ano, embora valores mais baixos sejam alcançados na prática. A garantia fornecida pelos fabricantes, em geral, é de uma depreciação máxima de 1 % ao ano [19]. Assim, foi considerada uma taxa de depreciação anual de 0,8 % ao ano, na produção de energia (que totaliza a perda de 20 % dentro dos 25 anos de garantia). Por outro lado, a maioria dos fabricantes considera como necessária a troca do inversor com 10 anos de operação contínua [34]. Montenegro [35] aplicou em sua pesquisa a taxa de 1 % ao ano referente a custos com operação e manutenção com sistemas fotovoltaicos. Dessa maneira, foi considerada o valor relativo a 1 % sobre o investimento inicial a cada 10 anos, referente à troca dos inversores.

O consumo mensal do *campus* Floriano do IFPI referente ao primeiro ano de operação, encontra-se descrito na Fig. 11. Destacam-se no gráfico apresentado os meses de setembro e outubro de 2016 que tiveram o maior e o menor consumo de energia, respectivamente.

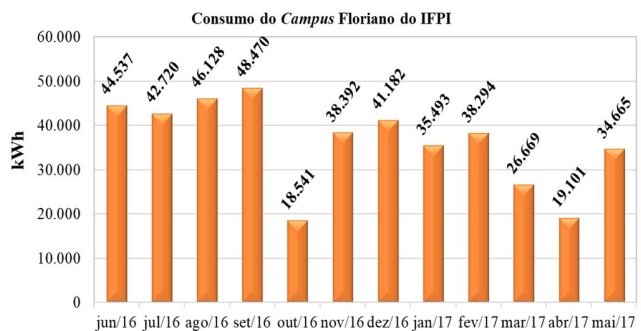


Fig. 11. Consumo mensal do *campus* Floriano do IFPI no seu período considerado.

Por outro lado, comparando com o gráfico da Fig. 12, que traz um resumo da geração total do sistema fotovoltaico no período considerado, percebe-se que os meses de outubro de

2016 e fevereiro de 2017, apresentaram a maior e a menor geração de energia fotovoltaica, respectivamente. Ademais, destaca-se novamente o mês de outubro de 2016 além do mês de abril de 2017, cuja geração de energia foi maior que o consumo do *campus*, em decorrência das férias escolares que impacta na diminuição do consumo de energia.

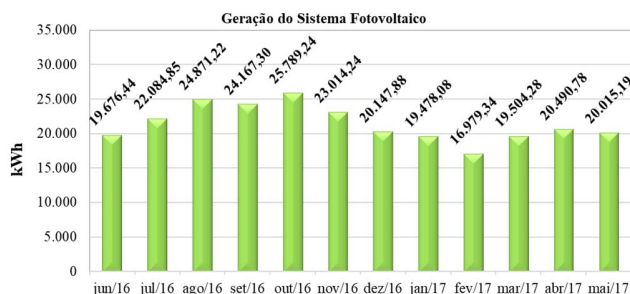


Fig. 12. Geração do sistema fotovoltaico no seu primeiro ano de funcionamento.

Em consulta ao calendário acadêmico do *campus*, disponível no site da instituição, verifica-se que no mês outubro de 2016, entre os dias 03 e 27, aconteceram as férias letivas entre os períodos letivos 2016.1 e 2016.2. Situação semelhante aconteceu nos meses de março e abril de 2017. Neste período ocorreram as férias que marcam o encerramento do ano letivo de 2016, justificando-se também o baixo consumo de energia elétrica nestes meses. No *campus* permaneceram em funcionamento apenas os seus setores administrativos e a iluminação noturna.

Assim, no período em análise, o consumo total no *campus* Floriano foi de 434.192,00 kWh, sendo que o consumo médio de energia por mês foi de 36.182,67 kWh. Analisando o gráfico, percebe-se que o consumo mensal é mais elevado em alguns meses do ano, o que se justifica analisando a Fig. 13. Como pode ser observado, o período que vai de agosto a novembro, é o mais quente do ano. Este fato propicia um incremento na temperatura ambiente fazendo com que o consumo de determinados equipamentos elétricos, como os equipamentos de ar condicionado, aumente por conta da necessidade de mantê-los em funcionamento por mais tempo. Porém, analisando o mês de outubro, que se encontra dentro do período mais quente do ano, verifica-se que neste mês o *campus* apresentou o mais baixo consumo.

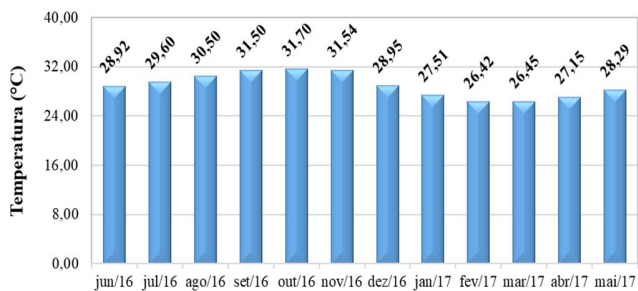


Fig. 13. Temperatura Mensal Média para a cidade de Floriano-PI no período analisado.

Na Tabela V é apresentado um resumo da análise de viabilidade econômica. Considerando o benefício gerado pelo

projeto (valor de R\$ 0,331276/kWh), o mesmo trouxe uma economia de R\$ 84.879,15 para a instituição, devido a economia de 256.218,84 kWh de energia elétrica. Este valor representa uma economia anual de energia da ordem de 59,01 % em relação ao consumo de energia do *campus*.

TABELA V
ANÁLISE ECONÔMICA DO SISTEMA

Dados da Análise	Valor
Investimento Inicial	R\$ 1.150.000,00
Economia de Energia Anual	256.218,84 kWh
Economia Percentual de Energia Anual	59,01%
Economia Monetária de Energia Anual	R\$ 84.879,15
Benefício do Projeto	0,331277 R\$/kWh
Taxa de Desconto	1,52 %
Taxa Interna de Retorno	1,91 %
Valor Presente Líquido	R\$ 263.172,06
Relação Custo Benefício	4,37
<i>Payback</i>	19 anos

Com base nessa análise, o valor investido inicialmente retornará para a instituição em 19 anos (*Payback*) e após os 25 anos de vida útil do projeto, a instituição deixaria de desembolsar R\$ 263.172,06, a uma TIR de 1,91 % ao ano, somente com a economia de energia elétrica a ser vista como abatimento nas faturas de energia, uma vez que na análise econômica, deixar de gastar é o mesmo que lucrar. Porém, observa-se que o projeto apresenta uma relação custo benefício bem maior que 1, o que mostra que ao final da vida útil do sistema o valor das entradas de capital após o pagamento do sistema não supera o valor inicial investido. Na Fig. 14 pode ser vista a projeção do fluxo de caixa através da evolução do VPL durante a vida útil do projeto e o momento em que o sistema se paga (*Payback*).

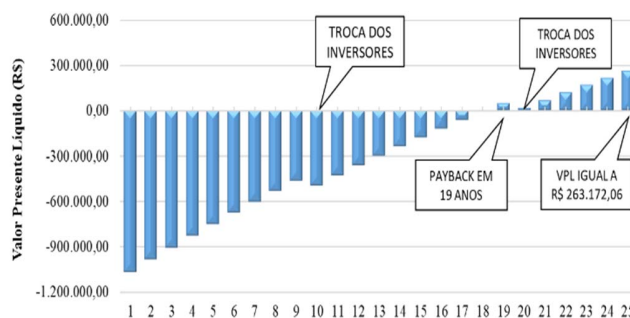


Fig. 14. Evolução do Valor Presente Líquido durante a vida útil do projeto.

Vale a pena destacar ainda que mesmo possuindo viabilidade técnica o projeto deve possuir aderência estratégica, avaliando se o mesmo foi desenvolvido para atender ou não às estratégias do plano da entidade, em especial os de longo prazo e, consequentemente, está alinhado a sua missão e visão. Isso pode ser verificado analisando-se o último Plano de Desenvolvimento Institucional do IFPI [36]. As IES devem ser exemplo de sustentabilidade para toda a comunidade. Precisam incentivar mudanças concretas na realidade social não só através de sua atividade fim (ensino, pesquisa e extensão), mas também com a articulação da gestão e a infraestrutura das

edificações. Mudanças estas que podem ser encaradas como Projetos de Investimento de Aderência Estratégica, uma vez que a sustentabilidade deve estar alinhada com a missão e a visão dessas organizações [21].

VI. CONCLUSÕES

A análise de desempenho do sistema fotovoltaico instalado no *campus* Floriano do IFPI demonstrou viabilidade técnica. Dessa maneira, pode ser uma alternativa energética para as instituições de ensino reduzirem custos com energia elétrica no estado do Piauí. Ao analisar a geração do primeiro ano de instalação do Sistema IFPI-FLORIANO, verificou-se que o sistema apresenta um excelente desempenho, com índices de mérito satisfatórios, a saber: Fator de Capacidade de 17,04 %, Produtividade Final de 1.493,12 kWh/kWp e Taxa de Desempenho de 73,54 %, como produção máxima no mês de outubro de 2016 (25.789,24 kWh) e mínima no mês de fevereiro de 2017 (16.979,34 kWh).

Porém, analisando os resultados da análise econômica, pode-se concluir que o SFCR instalado no *campus* Floriano do IFPI não possui viabilidade econômica, o que pôde ter sido causado pelo alto custo de implantação ou pelo baixo retorno financeiro, o que trouxe para o projeto um *payback* longo e uma relação custo benefício alta, o que possivelmente não foi levando em consideração em estudos prévios para a instalação do sistema fotovoltaico, devendo ser objeto de estudos futuros. Estudos estes que poderiam ter sido feitos com o auxílio de *softwares* dedicados à avaliação técnica e econômica de sistemas fotovoltaicos.

Dessa maneira, limitar os benefícios relacionados a SFCR apenas à redução dos gastos com a energia pode conduzir a decisões erradas, uma vez que os co-benefícios para o meio ambiente ou para as atividades de ensino, pesquisa e extensão, considerando a atividade fim da instituição, podem ser tão relevantes quanto. As instituições de ensino devem ser, portanto, exemplo de sustentabilidade para toda a comunidade e incentivar mudanças concretas na realidade social não só através de sua atividade fim (ensino, pesquisa e extensão), mas também com a articulação da gestão e a infraestrutura das edificações podendo ainda ser encaradas como projetos de investimento de aderência estratégica, uma vez que a sustentabilidade deve estar alinhada com a missão e a visão dessas organizações.

Por fim, ressalta-se a necessidade de estudos mais aprofundados onde se possa verificar a influência da temperatura dos módulos, do fator de dimensionamento dos inversores instalados. Também uma análise de sombreamento causado pela orientação e posicionamento dos módulos e pela própria volumetria do telhado e dos demais blocos que compõem o *campus* na produtividade do sistema, tendo em vista que também são fatores determinantes na quantidade de energia produzida. Além disso, estes estudos devem envolver a instalação e utilização de equipamentos de medição e monitoramento de modo a analisar cada arranjo fotovoltaico de maneira isolada. Vale a pena ressaltar que a instalação invasiva de tais equipamentos nesta pesquisa poderia acarretar a perda de garantia dos equipamentos que compõem o sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Phillips, "Determining the sustainability of large-scale photovoltaic solar power plants", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 435-444, Nov. 2013, DOI: 10.1016/j.rser.2013.07.003.
- [2] J. Khan e M. H. Arsalan, "Solar power technologies for sustainable electricity generation – A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 414-425, Mar. 2016, DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.135.
- [3] G. A. Dávi, E. Caamaño-Martín, R. Rütther, J. Solano, "Energy performance evaluation of a net plus-energy residential building with grid-connected photovoltaic system in Brazil", *Energy and Buildings*, vol. 120, pp. 19-29, 15 May. 2016, DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.03.058.
- [4] C. Holdermann, J. Kissel, J. Beigel, "Distributed photovoltaic generation in Brazil: An economic viability analysis of small-scale photovoltaic systems in the residential and commercial sectors", *Energy Policy*, vol. 67, pp. 612-617, Apr. 2014, DOI: 10.1016/j.enpol.2013.11.064.
- [5] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Resolução Normativa nº 482 de 17 de abril de 2012. Disponível: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso: Set, 2018.
- [6] M. G. Villalva, *Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações*. 2.ed. São Paulo, SP, Brasil: Érica. 2015.
- [7] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. Disponível: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso: Set, 2018.
- [8] A.M. Vale, D.G. Felix, M.Z. Fortes, B.S.M.C. Borba, B.H. Dias, B.S. Santelli, "Analysis of the economic viability of a photovoltaic generation project applied to the Brazilian housing program Minha Casa Minha Vida", *Energy Policy*, vol. 108, pp. 292-298, Sep. 2017, DOI: 10.1016/j.enpol.2017.06.001.
- [9] Empresa de Pesquisa Energética – EPE. *Balanco Energético Nacional 2017: Ano base 2016*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: EPE, 2017.
- [10] Empresa de Pesquisa Energética – EPE. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2026*. Brasília, DF, Brazil: MME/EPE, 2017.
- [11] A. Dolara, F. Grimaccia, S. Leva, M. Mussetta, R. Farana, M. Gualdoni, "Performance Analysis of a Single-Axis Tracking PV System", *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 2, no. 4, pp. 524-531, Oct, 2012, DOI: 10.1109/JPHOTOV.2012.2202876.
- [12] B. Marion, J. Adelstein, K. Boyle, H. Hayden, B. Hammond, T. Fletcher, B. Canada, D. Narang, D. Shugar, H. Wenger, A. Kimber, L. Mitchell, G. Rich, T. Townsend, "Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems", *Conference Record of the 31th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, pp.1601-1606, 2005, DOI: 10.1109/PVSC.2005.1488451.
- [13] M. Emmanuel, D. Akinyele, R. Rayudu, "Techno-economic analysis of a 10 kWp utility interactive photovoltaic system at Maungaraki school, Wellington, New Zealand", *Energy*, vol. 120, pp. 573-583, Feb. 2017, DOI: 10.1016/j.energy.2016.11.107.
- [14] F. H. M. Moraes, O. A. V. O. L. Silva, F. R. Barbosa, A. M. Moraes, "Avaliação Técnico-Econômica do Desempenho Operacional do Primeiro Ano de Geração de um SFCR Integrado à Edificação", Apresentado no *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, Gramado, RS, Brasil, 2018.
- [15] International Electrotechnical Commission – IEC. *System Performance Monitoring – Guidelines for Measurement, Data Exchange, and Analysis, IEC Standart 61724*". Geneva, Switzerland, 1998.
- [16] H. A. Kazem, T. Khatib, K. Sopian, W. Elmenreich, "Performance and feasibility assessment of a 1.4 kW roof top grid-connected photovoltaic power system under desertic weather conditions", *Energy and Buildings*, vol. 82, pp. 123-129, Oct. 2014, DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.06.048.
- [17] S. Bhakta, V. Mukherjee, "Performance indices evaluation and techno economic analysis of photovoltaic power plant for the application of isolated India's island", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 20, pp. 9-24, Apr. 2017, DOI: 10.1016/j.seta.2017.02.002.
- [18] A. M. Khalid, I. Mitra, W. Warmuth, V. Schacht. "Performance ratio – Crucial parameter for grid connected PV plants". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 1139-1158, Nov. 2016, DOI: 10.1016/j.rser.2016.07.066.
- [19] R. K. Nakabayashi, *Microgeração fotovoltaica no Brasil: Viabilidade econômica*. São Paulo, SP, Brasil: IEE-USP (LSF), 2015.
- [20] F. Frezatti, *Gestão da viabilidade econômico-financeira dos projetos de investimento*. São Paulo, SP, Brasil: Atlas, 2008.
- [21] O. A. V. O. L. Silva, F. R. Barbosa, F. Pinheiro. *Viabilidade técnico-econômica da eficiência energética em edificações*. Curitiba, PR, Brasil: Prismas, 2017.

- [22] E. B. Pereira, F. R. Martins, A. R. Gonçalves, R. S. Costa, F. J. L. Lima, R. Rütther, S. L. Abreu, G. M. Tiepolo, S. V. Pereira, J. G. Souza, *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. 2.ed, São José dos Campos, SP, Brasil: INPE, 2017.
- [23] Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LABSOL-UFRGS. *Desenvolvimento de Softwares – SOLARCAD*. 2018. Disponível em: <http://www.solarufrgs.br/#softwares>. Acesso em: Set, 2018.
- [24] H. S. Gomes, F. C. Melo, L. C. Freitas, E. A. A. Coelho, V. J. Farias and Luiz C. G. Freitas, “Sistemas Fotovoltaicos Distribuídos: Estudo de caso de UFV de 2,16 kWp instalada na Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU”. *XI Conferência Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica*, Campina Grande, PB, Brasil, 2015.
- [25] J. U. Junior, E. F. C. Junior, G. M. Tiepolo, “Análise do desempenho de dois anos de operação do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do escritório verde da UTFPR”. *V Congresso Brasileiro de Energia Solar*, Recife, PE, Brasil, 2014.
- [26] G. M. Buiatti, F. R. S. Junior, A. C. F. Wanderley, S. B. Maciel, “Desempenho de micro e mini usinas fotovoltaicas no Instituto Federal do Rio Grande do Norte”. *VI Congresso Brasileiro de Energia Solar*, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2016.
- [27] F. J. L. Lima, “Previsão de Irradiação Solar no Nordeste do Brasil Empregando o modelo WRF Ajustado por Redes Neurais Artificiais (RNAs)”, Tese. Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil, 2015.
- [28] J. R. M. Ferreira Filho, F. R. F. Mendes, I. R. Sousa, J. R. B. Sousa, C.M.S. Medeiros, “Photovoltaic Panel Based Pumping System: A Solution Without Batteries”. *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, n.2, pp. 514-520, Feb. 2018. DOI: 10.1109/TLA.2018.8327407.
- [29] J. D. Barros, M. L. S. Furtado, A. M. B. Costa, G. S. Marinho, F. M. Silva, “Sazonalidade do vento na cidade de Natal/RN pela distribuição de Weibull”. *Sociedade e Território*, vol. 25, n. 2, pp. 78-92, Jul-Dez, 2013.
- [30] N. H. C. Carvalho, “Modelagem de Processo de Negócio de Geração Solar Fotovoltaica ou Eólica de Pequeno Porte no Contexto da Resolução Normativa ANEEL N° 482/2012”, Dissertação. Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil, 2014.
- [31] Eletrobrás Distribuição Piauí – EDP-PI, *Tarifas*. 2017. Disponível: <http://www.eletobraspiaui.com/index.php/sua-conta/tarifas/>. Acesso: Set, 2018.
- [32] BCB. Banco Central do Brasil. *Histórico das taxas de juros*. 2017. Disponível: <https://www.bcb.gov.br/Pec/Copom/Port/taxaSelic.asp#notas>. Acesso: Set, 2018.
- [33] EDP-PI. Eletrobrás Distribuição Piauí. *Relatórios Administrativos*. 2017. Disponível: <http://www.eletobraspiaui.com/index.php/empresa/relatorios/relatorios-administrativos/>. Acesso: Set, 2018.
- [34] J. L. F. Landeira, “Análise técnico-econômica sobre a viabilidade de implantação de sistemas de geração fotovoltaica distribuída no Brasil”, Dissertação. Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.
- [35] A. A. Montenegro, “Avaliação do retorno do investimento em sistemas fotovoltaicos integrados a residências unifamiliares urbanas no Brasil”, Dissertação. Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2013.
- [36] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – IFPI. *Plano de Desenvolvimento Institucional (PDI) 2015-2019*. Teresina, PI, Brasil: IFPI, 2014.



Albemerc Moura de Moraes Possui graduação em Física pela Universidade Federal do Piauí (2006), Mestrado (2009) e Doutorado (2015) em Energia pela Universidade Federal do ABC. Atualmente é técnico em assuntos educacionais pela Universidade Federal do Piauí e Diretor Técnico Científico da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI) e coordenador do Grupo Interdisciplinar de Pesquisa em Energia Solar do Piauí (GIPES). Tem experiência na área de Energia, atuando principalmente nos seguintes temas: energias renováveis no meio rural, sistemas fotovoltaicos e bombeamento fotovoltaico.



Fábio Rocha Barbosa Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará (2004), Mestrado (2008) e Doutorado (2013) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará. Atualmente é professor do Curso de Engenharia Elétrica da UFPI-Universidade Federal do Piauí, onde também atua como Presidente da CICE - Comissão Interna de Conservação de Energia. Faz parte do Grupo Interdisciplinar de Pesquisa em Energia Solar do Piauí (GIPES). Autor de livros nas áreas de Eficiência Energética e Sistemas Elétricos de Potência, tem experiência em pesquisas de Inteligência Computacional aplicada a Engenharia Elétrica e Conservação e Uso Eficiente de Energia. Atua principalmente nos seguintes temas: eficiência energética, inteligência computacional, transformadores de potência, máquinas elétricas e automação industrial.



Fabrício Higo Monturil de Moraes Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Piauí, Teresina, (2010) e Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Piauí (2018). Atualmente é Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico do Curso Técnico em Eletrotécnica do Instituto Federal do Piauí.

Faz parte do Grupo Interdisciplinar de Pesquisa em Energia Solar do Piauí (GIPES). Atua nos seguintes temas: eficiência energética e sistemas fotovoltaicos.