

Comparação entre sistemas fotovoltaicos em modo fixo e com seguidor em uma instituição pública de ensino no Nordeste do Brasil

Baldoino Sonildo da Nóbrega^[1], Waleria Guerreiro Lima^[2], Raphael Henrique Falcão de Melo^[3], Edvan Cruz Aguiar^[4], Rute Cavalcante Pereira^[5], Isleimar de Sousa Oliveira^[6]

[1] baldoino.nobrega@ifpb.edu.br. IFPB/Campus Cajazeiras. [2] waleria.lima@faculdadegararapes.edu.br. Faculdade Guararapes-UNIFG-PE. [3] raphael.melo@ifpb.edu.br. IFPB/Campus Cajazeiras. [4] edvan.ed@gmail.com. UFCG/Campus Campina Grande. [5] rutecavalcante98@hotmail.com. [6] isleimar@gmail.com. IFPB/Campus Cajazeiras.

RESUMO

O presente trabalho tem o objetivo de apresentar um estudo comparativo de sistemas fotovoltaicos fixo e com seguidor solar, por meio da avaliação da viabilidade técnico-financeira em uma instituição de ensino pública localizada no Sertão do estado da Paraíba (Brasil). Por meio do *software* de simulação *System Advisor Model*, a produção de energia elétrica dos sistemas foi estimada. Em seguida, uma análise estatística foi realizada para avaliar as diferenças entre a produção de energia dos sistemas propostos. Por fim, indicadores financeiros foram utilizados para avaliar qual sistema possuía melhor viabilidade financeira. Os resultados sobre o desempenho evidenciaram que a produção anual de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos com seguidor é 32% superior à dos sistemas fixos. A análise estatística comprovou, por meio de teste de hipótese, que há evidências de que o sistema equipado com seguidor produz significativamente mais energia elétrica do que o sistema fixo. Quanto à avaliação financeira, o sistema fixo foi mais vantajoso, pois seus indicadores financeiros foram melhores em todos os aspectos. A pesquisa contribuiu para o melhor entendimento das diferenças entre sistemas fotovoltaicos quanto aos aspectos técnicos, financeiros e estatísticos, o que pode auxiliar na tomada de decisão no momento da escolha para instalação desses sistemas na região em estudo.

Palavras-chave: Energia solar. Seguidor solar. Produção de energia elétrica. Métodos estatísticos.

ABSTRACT

The present work has the objective of presenting a fixed and solar tracker photovoltaic systems comparative study, through the technical and financial viability evaluation in a public education institution located in the backlands of the state of Paraíba (Brazil). Through a System Advisor Model simulation software, we estimated the electrical energy production of the systems. Then, we performed a statistical analysis to evaluate the differences between the energy production of the proposed systems. Finally, financial indicators were used to assess which system had better financial viability. The results on performance have shown that the annual production of electric energy for photovoltaic systems with tracking is 32% higher than the fixed system. Statistical analysis proved by hypothesis testing that there is evidence that the tracking system produces more electric energy in relation to the fixed system. As for financial evaluation, the fixed system was more advantageous, since its financial indicators were better in all aspects. The research contributed to a better understanding of the differences between photovoltaic systems in terms of technical, financial and statistical aspects, which may help the decision making when choosing the installation of these systems in the region which is being studied.

Keywords: Solar energy. Solar tracking. Electricity production. Statistical methods.

1 Introdução

O sol é a principal fonte de energia para a Terra. A energia solar é limpa, renovável e abundante na maior parte do mundo, e pode ser convertida em energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos (EKE; SENTURK, 2012; PINHO; GALDINO, 2014). Do total de energia solar que chega à Terra, aproximadamente metade atinge a superfície, ou seja, 885 milhões de terawatts (TW) a cada ano. Isso significa mais de seis mil vezes o consumo total de energia no mundo em 2008 e mais de três mil vezes a energia que a humanidade consumirá em 2050, de acordo com os cenários traçados pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2014).

A conversão da energia solar em energia elétrica, a partir de sistemas fotovoltaicos, tem registrado crescimento recorde nos últimos anos. Em 2010 representou 40 GW de capacidade global instalada e, ao final de 2016, chegou ao patamar de 402 GW. China, Japão, Alemanha e Estados Unidos foram responsáveis pela maior parte da capacidade agregada, mas mercados em todos os continentes contribuíram significativamente para esse aumento, impulsionado em grande parte pela crescente competitividade da tecnologia fotovoltaica e pela necessidade de redução dos gases do efeito estufa (SAWIN *et al.*, 2018).

Vários fatores influenciam a utilização de sistemas fotovoltaicos. Alguns desses são: a disponibilidade de irradiação solar, o desempenho, o custo e o preço da energia elétrica convencional. Quanto à disponibilidade de irradiação solar, valores elevados desse recurso podem indicar boas áreas para exploração da energia fotovoltaica, já que há uma dependência dessa variável para conversão da energia solar em energia elétrica. Um país que possui esse recurso de forma abundante é o Brasil, inclusive com níveis de irradiação solar maiores que os de Alemanha, França e Espanha, onde projetos de aproveitamento de recurso solar são amplamente incentivados (PEREIRA *et al.*, 2017).

Outro fator que influencia a produção de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos é seu baixo desempenho, principalmente daqueles instalados de forma fixa, os quais acabam não aproveitando de forma eficiente o movimento diário do sol (BAKHSHI; SADEH, 2016). A eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica por fonte fotovoltaica é de aproximadamente 15%, considerado um valor baixo quando comparado a outras fontes renováveis, como por exemplo a eólica e a hidráulica (PINHO; GALDINO, 2014).

Uma forma de maximizar a produção de energia em sistemas fotovoltaicos é seguir os raios do sol de modo perpendicular, durante o dia, por meio de dispositivos denominados seguidores ou rastreadores solares (DRURY *et al.*, 2014; BAHRAMI; OKOYE; ATIKOL, 2016). Eke e Senturk (2012) observaram um ganho de produção de energia de 30% (em kWh) ao utilizar um seguidor solar em comparação a um sistema fotovoltaico fixo. Resultados próximos também foram obtidos por Eldin, Abd-Elhady e Kandil (2016) e Hammad *et al.* (2017). No Brasil, estudos indicaram que os ganhos com esses dispositivos foram de 20% a 36,1% na Região Nordeste (OLIVEIRA, 2007; BARBOSA, 2016; VIEIRA *et al.*, 2016).

Os seguidores solares se tornam importantes devido aos movimentos diários e sazonais da Terra, que afetam a intensidade da irradiação sobre os sistemas fotovoltaicos (BARBOSA, 2016). Uma vantagem da instalação dos seguidores é a possibilidade de manter a potência do painel solar próximo da máxima desde o início da manhã até o final da tarde, visto que este estará seguindo os raios do sol. O sistema equipado com seguidor solar pode rastrear o sol em um eixo (de acordo com o ângulo azimutal) ou em dois eixos (de acordo com os ângulos azimutal e de altitude solar) (EKE; SENTURK, 2012). Pela simplicidade e baixo custo dos sistemas de um eixo frente ao seu resultado, geralmente, há uma tendência de uso desses mecanismos nas usinas fotovoltaicas em detrimento do seguidor de eixo duplo (TOLMASQUIM, 2016).

É importante ressaltar que a utilização de seguidores solares tem aumentado no Brasil, bastando analisar os empreendimentos fotovoltaicos participantes dos leilões de energia de reserva, ocorridos em 2014 e 2015, nos quais a maioria (73%) utiliza esses dispositivos de eixo único (sentido leste/oeste) (EPE, 2015a; EPE, 2015b). Desses empreendimentos de leilões de reserva equipados com seguidor solar, dois foram instalados na Paraíba, no município de Malta, sertão do estado, com capacidade de 27 MWp cada.

Mesmo sabendo que a aplicação de um seguidor solar pode resultar em níveis de produção de energia mais elevados, isso não significa, necessariamente, uma melhor viabilidade financeira, uma vez que os custos de capital e manutenção também aumentam (BAKHSHI; SADEH, 2016). Logo, antes de realizar qualquer implementação de seguidores solares, sempre é recomendável fazer comparações com os custos de sistemas fixos, para compreender qual é o mais viável financeiramente (COGEN, 2012).

A redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos tem favorecido sua utilização, visto que, nas últimas décadas, a diminuição dos preços tem sido considerável. No Brasil, entre junho de 2016 e janeiro de 2018, houve uma redução de aproximadamente 30% nos custos desses sistemas (GREENER, 2018). Esse decréscimo, juntamente com uma trajetória de aumento no preço da energia elétrica gerada por outras fontes convencionais e uma regulamentação para o setor de geração distribuída (ANEEL, 2012, 2015), tem tornado a utilização da fonte fotovoltaica cada vez mais viável no Brasil e, por consequência, promovido uma paridade tarifária. Dados históricos de tarifas médias de energia elétrica, para o período de 1995 a 2014, indicam uma evolução de 9,6% ao ano, enquanto o índice de preço ao consumidor evoluiu a uma média de 6,4% (NAKABAYASHI, 2014).

Devido ao aumento do preço da energia elétrica, vários setores tiveram que destinar mais recursos para cobrir os gastos com energia, a exemplo do poder público federal, que tem pago somas elevadas nesse segmento. De acordo com o boletim de despesas de custeio administrativo de 2016, os valores pagos foram de R\$ 1,5 bilhão em 2014, R\$ 2,1 bilhões em 2015 e de aproximadamente R\$ 2,2 bilhões em 2016 (BRASIL, 2016). O Ministério da Educação, que é responsável pelas universidades, institutos e hospitais universitários, por exemplo, contribui para essa conta com valores entre R\$ 600 e R\$ 700 milhões/ano.

Para melhoria da eficiência energética, o poder público federal tem implementado algumas diretrizes com o objetivo de reduzir os gastos com energia elétrica. Como exemplo, tem-se a Lei nº 9.991/2000, que dispõe sobre a realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento em eficiência energética por parte de empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica (BRASIL, 2000); a Lei nº 10.295/2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, visando à alocação eficiente de recursos energéticos e à preservação ambiental (BRASIL, 2001); a Portaria nº 23/2015 do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, que estabelece boas práticas de gestão e uso de energia elétrica e de água nos órgãos e entidades da Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional e dispõe sobre o monitoramento de consumo desses bens e serviços (BRASIL 2015b); entre outras ações.

No que diz respeito às instituições federais de ensino, uma medida adotada para reduzir os gastos com energia elétrica tem sido instalar sistemas

fotovoltaicos. Aproximadamente 11% das instituições federais de ensino já utilizam esses sistemas (BRASIL, 2015a). Essas ações, além de auxiliarem na redução dos gastos com energia elétrica, promovem um efeito pedagógico no público, visto que sensibilizam a sociedade para a importância de ações sustentáveis (LEE *et al.*, 2016). Alguns estudos (SAHOO *et al.*, 2015; LEE *et al.*, 2016; TAN; CHOW, 2016; AL-NAJIDEEN; ALRWASHDEH, 2017) têm realizado análises sobre a viabilidade de sistemas fotovoltaicos em instituições de ensino, com o objetivo de verificar a viabilidade financeira e, por consequência, a redução de gastos com energia elétrica.

De modo geral, a maioria dos estudos sobre sistemas fotovoltaicos com estruturas fixas fazem apenas análise de indicadores financeiros, enquanto, para sistemas equipados com seguidor solar, os estudos frequentemente se preocupam em atestar tão somente o ganho energético com a utilização dessa tecnologia, sem verificar, necessariamente, a viabilidade financeira e se os ganhos de produção são estatisticamente significativos. Em face disso, o objetivo deste artigo foi realizar um estudo comparativo de sistemas fotovoltaicos fixo e com seguidor solar por meio da avaliação da viabilidade técnico-financeira em uma instituição federal de ensino localizada no sertão do estado da Paraíba. O recurso solar, a simulação dos sistemas e os métodos estatísticos foram itens avaliados para verificação das diferenças na produção de energia elétrica.

2 Método

O estudo comparativo foi realizado para o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), no *campus* localizado na cidade de Cajazeiras, no sertão do estado da Paraíba, região nordeste do Brasil. A instituição foi escolhida devido ao fato de estar localizada em uma área que, segundo Pereira *et al.* (2017), possui altos valores médios de irradiação global horizontal – aproximadamente 5,9 kWh/m².dia. Outros fatores que contribuíram para essa escolha foram: i) ter elevados gastos com energia elétrica; ii) ser uma instituição de ensino, que poderá fazer uso do sistema fotovoltaico para pesquisa e extensão; iii) contribuir para um meio ambiente mais sustentável diante de suas comunidades interna e externa. Geograficamente, o *campus* em estudo está localizado no hemisfério sul, com latitude de 6,89° S, longitude de 38,58° W e altitude de 298 m.

O sistema foi dimensionado com painéis fixos para serem instalados nos telhados de três edificações (Bloco 4, Bloco 4A e Bloco 7), com área total de aproximadamente 1.000 m². A escolha das edificações levou em consideração a proximidade da subestação de energia elétrica, a inexistência de árvores próximas ou de sombreamento por outros edifícios, a localização na parte mais alta do terreno e a capacidade estrutural para manter o peso adicional de cada módulo fotovoltaico.

2.1 Software de simulação

Para estimar a produção de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos, este estudo utilizou o *software* de simulação *System Advisor Model* (SAM – versão 2017.9.5), desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), pertencente ao Departamento de Energia Renovável dos Estados Unidos. Esse *software* foi projetado para realizar análises de desempenho e financeiras com o objetivo de facilitar a tomada de decisão pelas pessoas envolvidas no setor de energia renovável, como gerentes de projetos, engenheiros, analistas de políticas, desenvolvedores de tecnologia e pesquisadores (NREL, 2017).

O *software* SAM dispõe de diversos modelos para estimar a produção de energia de um sistema fotovoltaico conectado à rede, seja residencial ou comercial, fixo ou com seguidor, além de realizar análises paramétricas e estocásticas e possibilitar a criação de macros. As estimativas de produção de energia são baseadas nas variáveis de entrada do modelo, que devem ser definidas pelo usuário ou admitidas a partir de propostas já existentes no *software*.

2.2 Recurso solar

Antes de realizar a estimativa de produção de energia, o recurso solar disponível foi analisado a fim de averiguar o potencial de instalação de sistemas fotovoltaicos no local do estudo. A determinação da quantidade de irradiação solar incidente na superfície horizontal foi obtida a partir dos dados sobre o clima local do banco de dados do *National Solar Radiation Database* (NSRDB), disponibilizados pelo NREL no SAM.

Os valores estão no formato de Ano Meteorológico Típico (TMY – *Typical Meteorological Year*) e estão disponíveis por hora que melhor representa as

condições climáticas durante um período de vários anos. Além dos recursos solares, também estão inclusos dados meteorológicos como a velocidade do vento e a temperatura ambiente. Com esses dados, foi realizada uma análise descritiva do recurso solar e, em seguida, o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos fixo e com seguidor. Por fim, as informações de irradiação global horizontal foram organizadas em valores médios diários em kWh/m².dia.

2.3 Estimativa da produção de energia elétrica

Para realizar o dimensionamento dos sistemas, primeiramente, foi realizada uma análise do consumo de energia elétrica da instituição em estudo, por meio das contas de energia elétrica do ano de 2017, a fim de determinar a média mensal e compreender quais eram os meses de maior e de menor consumo. Em seguida, um sistema fotovoltaico com painéis fixos foi dimensionado para ser instalado no telhado das edificações escolhidas na instituição.

Para a área disponível no IFPB Campus Cajazeiras, um sistema fotovoltaico fixo foi dimensionado com capacidade de 103 kWp de potência, ocupando uma área de 614 m² com 323 módulos e 4 inversores. O ângulo de inclinação utilizado foi de 10° e o azimute, 106°, escolhidos a partir de medidas obtidas dos telhados da instituição em estudo, visto que colocar o sistema posicionado para o norte verdadeiro (azimute 0°) e a inclinação igual à latitude – o que é indicado na literatura como posição ideal – necessitaria de uma estrutura mais robusta, o que acarretaria custos adicionais ao sistema (KALOGIROU, 2013).

É importante ressaltar que, de acordo com Nóbrega *et al.* (2018), a inclinação de 10° foi uma das que apresentaram melhor desempenho para sistemas fotovoltaicos instalados na localidade deste estudo (Cajazeiras-PB), inclusive permitindo várias orientações azimutais.

Para o sistema fotovoltaico com seguidor solar, foi utilizada a mesma capacidade de 103 kWp do sistema fotovoltaico fixo. O seguidor solar utilizado neste estudo foi o de eixo único e horizontal, que segue o caminho diário do sol no sentido leste-oeste. A escolha de tal configuração teve por razão ser esta uma das mais utilizadas nos leilões de energia (EPE 2015a, 2015b) e ser mais econômica do ponto de vista financeiro (TOLMASQUIM, 2016).

Os componentes utilizados nos dois sistemas foram módulos multicristalino com 315 Wp de potência

e 16,5% de eficiência, conectados a quatro inversores Sun Power SPR-24000. É importante lembrar que inversores com potência um pouco menor do que a do conjunto de painéis fotovoltaicos tendem a operar com melhor nível de eficiência. O módulo multicristalino foi escolhido por ser um dos mais utilizados no Brasil (GREENER, 2018) e também por ter sido usado como base pela maioria dos participantes dos leilões de venda de energia, conforme estudos realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2015a, 2015b).

2.4 Análise estatística

A análise estatística foi utilizada para avaliar o consumo de energia e a disponibilidade do recurso solar e para compreender as diferenças na produção de energia elétrica entre os dois sistemas fotovoltaicos simulados. Os métodos utilizados para avaliação do consumo de energia e do recurso solar foram as medidas de tendência central e de dispersão.

Para comparar as médias de produção de energia elétrica dos sistemas e verificar se a quantidade gerada pelo sistema equipado com seguidor é superior à gerada pelo sistema fixo, foi utilizado o teste de hipótese para duas amostras independentes, o qual assumiu como hipótese nula (H_0) a igualdade entre médias e, como hipótese alternativa (H_1), a média de produção do sistema com seguidor como sendo superior à do sistema fixo. Vale ressaltar que, para aplicação de teste de hipótese, é necessário primeiro verificar os aspectos de normalidade para ambos os conjuntos de dados. O teste de hipótese aplicado para analisar se os dados nas duas amostras tendem a seguir o modelo de uma distribuição normal foi o teste de Shapiro-Wilk, que, de acordo com estudos de Torman, Coster e Riboldi (2012), foi um dos testes avaliados com melhor desempenho nas análises para identificar corretamente a normalidade dos dados.

Neste estudo, considerou-se um nível de significância de 5% para os testes de hipótese aplicados. As análises estatísticas foram realizadas no *software* livre para computação estatística R-project versão 3.4.4.

2.5 Avaliação de viabilidade financeira

Realizado o dimensionamento dos sistemas, indicadores financeiros foram utilizados para avaliar a viabilidade financeira e auxiliar na tomada de decisão acerca da instalação de um sistema fotovoltaico em detrimento do outro, tendo como padrão de

comparação o custo da energia elétrica fornecida pela distribuidora de energia local.

Os indicadores financeiros utilizados neste trabalho foram a Taxa Interna de Retorno (TIR), o Valor Presente Líquido (VPL) e o *payback* descontado, também usados por Lima (2012), Nakabayashi (2014), Kebede (2015), Sahoo *et al.* (2015), Lee *et al.* (2016), Tan e Chow (2016) e Al-Najideen e Alwashdeh (2017). De forma complementar, utilizou-se também o método do Custo Médio Nivelado de Energia (*Levelised Cost of Energy – LCOE*), bastante comum nas análises de viabilidade de projetos de energia e usado para comparar diferentes fontes de energia (MAYER *et al.*, 2015).

O Valor Presente Líquido (VPL) (Equação 1) é a diferença entre o valor presente das entradas líquidas de caixa associadas ao projeto e o investimento inicial. Esse método de avaliação proporciona uma comparação entre o valor investido hoje e o valor esperado no futuro, na forma de fluxo de caixa líquido, considerando a inflação. É um dos indicadores mais efetivos para avaliar a rentabilidade de um projeto de longo prazo (LEE *et al.*, 2016). Um valor positivo indica um investimento viável.

$$VPL = \sum_{t=1}^N \frac{F_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (1)$$

onde: I_0 é o investimento inicial; F_t é o fluxo de caixa no instante t ; r é a taxa de desconto; N é a vida útil do sistema considerado no estudo.

O *payback* descontado (Equação 2) é utilizado como método de análise capaz de evidenciar o tempo necessário para recuperar o investimento inicial. Esse método considera o valor do dinheiro no tempo, pois utiliza uma taxa de desconto para verificar o número exato de períodos em que o projeto recupera o valor inicial investido.

$$Payback\ descontado = \frac{I_0}{\sum \frac{F_n}{(1+r)^n}} \quad (2)$$

onde: F_n é o fluxo de caixa líquido esperado como retorno do investimento; n é o número de períodos ou número de fluxo de caixa considerado para o retorno do investimento a ser realizado.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) de um investimento é a taxa exigida de retorno que, quando utilizada como taxa de desconto, resulta em um VPL igual a zero. Assim, quando o VPL é zero, o ponto de equilíbrio econômico do projeto é encontrado e, desse modo, não haverá criação nem redução de valor. Um projeto é mais viável quando a diferença entre TIR e

taxa de desconto se torna maior (em geral, a taxa de desconto é algum tipo de aplicação financeira). Do ponto de vista matemático, é o valor de r na Equação 1 que iguala o VPL a 0. A TIR pode ser calculada de acordo com a Equação 3:

$$\sum_{t=1}^N \frac{F_t}{(1+r)^t} - I_0 = 0 \quad (3)$$

O LCOE consiste no preço mínimo que um gerador teria que receber por cada kWh de produção de eletricidade a fim de cobrir os custos de produção dessa energia, incluindo os recursos mínimos exigidos no investimento do gerador (Equação 4). Vale lembrar que, usado isoladamente, esse método não é adequado para analisar a viabilidade financeira de um sistema específico. Para isso, deve-se complementar o estudo considerando todas as receitas e despesas, com base em um modelo de fluxo de caixa (SCHMALENSEE *et al.*, 2015).

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^N \frac{OM_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{Q_t}{(1+r)^t}} \quad (4)$$

onde: OM_t são os custos anuais com operação e manutenção; Q_t é a quantidade de energia produzida no respectivo ano t em kWh; N é a vida útil do sistema; t é o ano em consideração, que pode variar de 1 até N .

A atual tarifa de eletricidade para a instituição analisada foi considerada uniforme durante o ano para o horário fora de ponta, no valor de R\$ 0,32/kWh. Uma previsão de aumento anual de 6% nas tarifas de energia seguiu o histórico da inflação dos últimos 10 anos, método também utilizado por Nakabayashi (2014). Os custos anuais de operação e de manutenção foram estimados em 1% para sistemas fixos e 1,6% para sistemas com seguidor solar, valores estes considerados nos leilões de energia de reserva no Brasil (EPE, 2015a, 2015b). O tempo de vida útil estimado para os módulos fotovoltaicos foi de 25 anos, como descrito pela maioria dos fabricantes (PINHO; GALDINO, 2014). A degradação dos módulos considerada foi de 0,5% ao ano, valor utilizado e discutido nos trabalhos de Viana *et al.* (2012) e de Jordan e Kurtz (2013).

Os valores de instalação dos sistemas fotovoltaicos foram obtidos de uma pesquisa realizada pela empresa Greener Tecnologias Sustentáveis com 552 empresas do setor de energia solar fotovoltaica. A pesquisa cita um valor médio de R\$ 4,45 por Wp instalado para

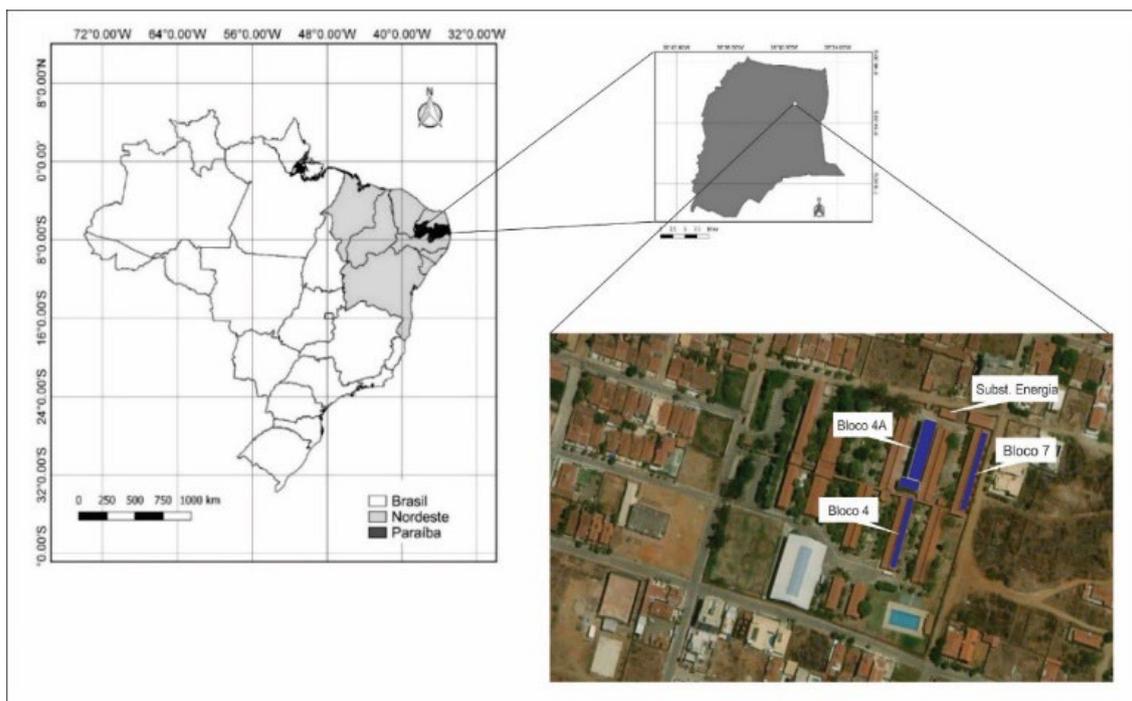
sistemas entre 75 kWp e 150 kWp. Esses valores são para sistemas fixos. Para identificar valores para sistemas com seguidor, foram analisadas as diferenças dos preços apresentados nos leilões de energia de reserva para sistemas fotovoltaicos, e verificou-se que os preços dos sistemas com seguidor seriam, em média, 50% maiores que os preços de sistemas fixos. Em consequência, foi estimado um valor atual de R\$ 6,67 por Wp para sistemas com seguidor. Todo esse cálculo foi necessário para garantir acurácia dos resultados, já que não há uma pesquisa atual para valores dos sistemas com seguidor solar. Uma troca de inversores após dez anos de uso dos sistemas foi planejada. A taxa de desconto considerou a média dos últimos dez anos da taxa Selic no Brasil (10,7%), de acordo com informações do Banco Central.

3 Resultados e discussão

O Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) é uma instituição autárquica de regime especial, de ensino, pesquisa e extensão, vinculada ao Ministério da Educação, e conta com diversos *campi* no estado da Paraíba. No entanto, este estudo está direcionado apenas ao *campus* localizado na cidade de Cajazeiras (Figura 1 na página seguinte), o qual tem 24 anos de existência e oferta cinco cursos superiores, quatro cursos técnicos integrados ao ensino médio, dois cursos técnicos subsequentes ao ensino médio e um curso de pós-graduação *lato sensu* em matemática. De acordo com o controle acadêmico, o *campus* possuía, em 2018, 1.465 alunos, 108 docentes e 82 técnicos administrativos.

Com base nos dados disponibilizados no *National Solar Radiation Database* (NSRDB), os valores médios de irradiação global horizontal para a cidade de Cajazeiras são de 6,65 kWh/m².dia. Os maiores níveis de irradiação ocorrem durante os meses de agosto a novembro e os menores, entre abril e julho (Figura 2 na próxima página). Quanto às demais características climáticas, a região tem clima semiárido, quente e seco, sendo definido em duas estações, seca e chuvosa. A cidade apresenta baixa nebulosidade, forte insolação e temperatura média diária de 27,08°C, que, no entanto, pode variar entre 21°C e 41°C.

Figura 1 – Localização do município de Cajazeiras-PB e do respectivo campus do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB)



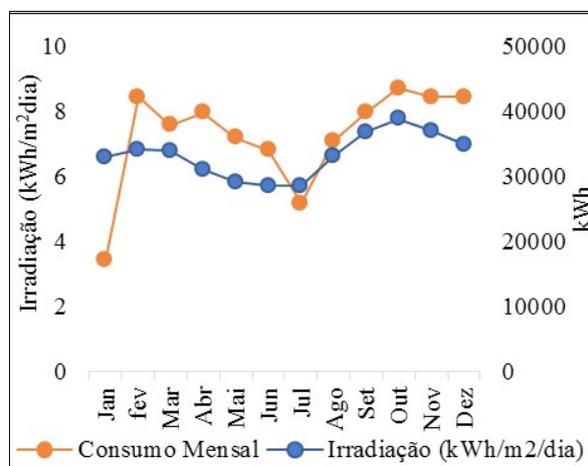
Fonte: Adaptado dos softwares SAM e QGIS

3.1 Consumo de energia elétrica do IFPB Campus Cajazeiras

O consumo médio mensal de energia elétrica pelo *campus* em estudo no ano de 2017 foi de 43.680 kWh, com um máximo de 52.800 kWh ocorrido no mês de outubro e mínimos de 20.160 kWh e 31.200 kWh nos meses de janeiro e julho, respectivamente (Figura 2). Esses últimos valores justificam-se por terem ocorrido em período de férias docentes e discentes. Esses valores incluem o consumo no horário de ponta e no horário fora de ponta. No entanto, para este estudo, apenas o consumo mensal fora do horário de ponta foi considerado, visto que esses são os momentos que incluem a disponibilidade de irradiação solar. Dessa forma, o valor médio mensal passou a ser de 36.400 kWh, o máximo de 43.680 kWh e os mínimos de 17.280 kWh e 29.920 kWh, nos respectivos meses já citados.

É possível observar, na Figura 2, a coincidência temporal entre a disponibilidade de irradiação solar no plano horizontal e o consumo anual fora de ponta. Isso torna a aplicação fotovoltaica possivelmente mais atrativa para a instituição em estudo, visto que o aumento e a redução no consumo de energia elétrica

Figura 2 – Média diária de irradiação global horizontal versus consumo mensal de energia elétrica



Fonte: Banco de dados NSRDB e faturas de energia do IFPB Campus Cajazeiras

ocorrem no mesmo período em que a irradiação solar aumenta e diminui, respectivamente. O consumo total de energia elétrica durante o ano de 2017 no horário fora de ponta foi de 436.800 kWh.

3.2 3.2 Estimativa de produção de energia para os sistemas fixo e com seguidor

Os valores estimados da produção anual de energia elétrica para o sistema fixo com inclinação de 10° e para o sistema com seguidor são, respectivamente, de 182.344,90 kWh e 240.265,50 kWh (Tabela 1), que significariam uma redução de 41,7% e 55% do consumo de energia elétrica convencional observado fora de ponta, respectivamente. A diferença na produção indicou que o sistema com seguidor solar produz 32% a mais que o fixo (Tabela 1).

O percentual de 32% de rendimento extra para sistemas com seguidor está de acordo com outros estudos, realizados no Brasil e em outros locais do mundo. Estudos experimentais realizados em cidades com latitudes e longitudes próximas e com climas similares – Mossoró-RN (latitude 5° 11' S), Fortaleza-CE (latitude 3° 7' S) e Recife-PE (latitude 8° 3' S) – encontraram valores adicionais de 20% (VIEIRA *et al.*, 2016), 27,42% (BARBOSA, 2016) e 36,1% (OLIVEIRA, 2007), respectivamente, para seguidores de eixo único. Ao compará-lo com resultados de outros lugares do mundo, o valor de 32% está no intervalo entre 25% e 39% encontrado nos trabalhos de Eke e Senturk (2012), Bazaryari *et al.* (2014), Eldin, Abd-Elhady e Kandil (2016), Hammad *et al.* (2017) e Sumathi *et al.* (2017).

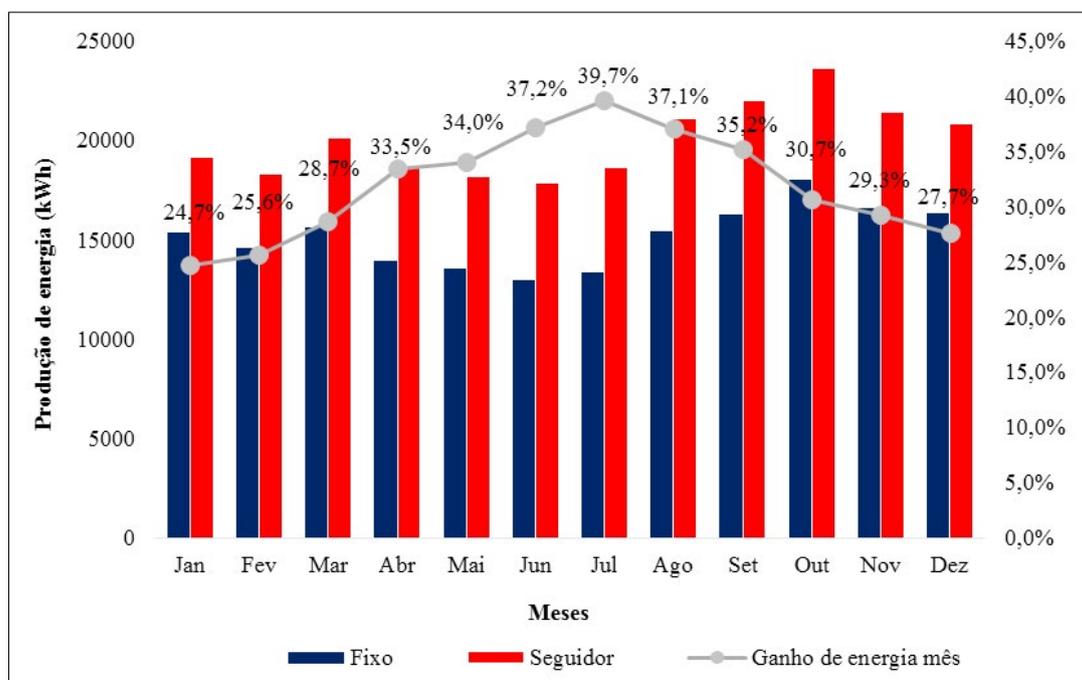
A análise exploratória de dados da produção de energia elétrica mensal pelos dois sistemas é apresentada na Tabela 1. É possível observar que a produção máxima do sistema fixo atinge 18.074,80 kWh durante o mês de outubro (Figura 3), enquanto a mínima mensal para o sistema com seguidor é de 17.870,90 kWh e ocorre no mês de junho (Figura 3).

Tabela 1 – Análise descritiva da produção de energia pelos sistemas fotovoltaicos simulados

Métricas	Produção do sistema fixo (kWh)	Produção do sistema com seguidor (kWh)	Ganhos (%)
Máxima	18.074,80	23.630,30	31
Mínima	13.020,70	17.870,90	37
Média	15.195,40	20.022,12	32
Mediana	15.411,65	20.175,05	31
Desvio padrão	1.526,18	1.861,66	-
Coefficiente de variação	0,10	0,09	-
Curtose	-0,59	-0,56	-
Assimetria	0,22	0,62	-
Produção anual	182.344,90	240.265,50	32

Fonte: Dados obtidos por meio do software SAM

Figura 3 – Diferenças de produção mensal de energia elétrica e ganhos de produção do seguidor solar



Fonte: Dados obtidos por meio do software SAM

Observa-se que a produção mínima do sistema com seguidor é bem próxima à máxima do sistema fixo. Isso comprova a maior eficiência do sistema que acompanha o caminho do sol no sentido leste-oeste. Os dois sistemas possuem baixos coeficientes de variação (Tabela 1), indicando que a média mensal tem boa representatividade e pouca variação anual, o que pode ser explicado pelo fato de regiões próximas à linha do Equador apresentarem menor variação na radiação solar ao longo do ano (PEREIRA et al., 2017).

O sistema com seguidor solar apresenta ganhos adicionais de energia produzida em relação ao sistema fixo, mês a mês, como pode ser observado na Figura 3. Verifica-se que o período de menor produção para ambos os sistemas são os meses de abril a julho. Nos meses de junho e julho ocorrem os ganhos mais consideráveis com a instalação do seguidor solar: 37,2% e 39,7%, respectivamente. Durante esses meses, que integram a estação de inverno no hemisfério sul, há uma redução na disponibilidade de recurso solar explicada pelos movimentos da Terra, pois os dias são

mais curtos e há menos radiação solar nessa época do ano (TOLMASQUIM, 2016). Isso implica melhor desempenho para sistemas que acompanham o movimento diário do sol durante o período de baixa disponibilidade de recurso solar. Observa-se também que, nos meses de agosto a março (Figura 3), ocorrem as maiores produções de energia, com ênfase para o período de outubro e novembro para sistemas fixos e de setembro e outubro para sistemas com seguidor.

3.3 Estatística inferencial

Para realizar a análise de estatística inferencial, primeiro aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk, com a seguinte hipótese nula (H_0): os dados seguem uma distribuição normal. O resultado do teste (Tabela 2) obteve p -valor maior que 0,05, isto é, não se rejeita a hipótese nula. Logo, com uma confiabilidade de 95%, pode-se inferir que os conjuntos de dados tendem a seguir uma distribuição normal.

Tabela 2 – Teste t para os sistemas fotovoltaicos fixo e com seguidor

Sistema	Base de dados	Médias (kWh)	Diferenças médias (kWh)	Teste t	Shapiro-Wilk
Sistemas fotovoltaicos	Seguidor	20.022,12	4.826,71	0,00*	0,31
	Fixo	15.195,40			0,78

Fonte: Dados da pesquisa

*Significância de 5%

Quanto à verificação da hipótese de diferença entre médias dos sistemas, observou-se, por meio do teste t , que há evidências de que o sistema fotovoltaico com seguidor solar produz mais energia elétrica, de forma significativa, do que o instalado de modo fixo (Tabela 2). Isso comprova o argumento de que há diferença estatística entre as médias de produção dos sistemas e que, neste estudo, ao analisar apenas essa variável, o sistema com seguidor é mais efetivo que o sistema fixo. Alguns estudos na literatura (OLIVEIRA, 2007; EKE; SENTURK, 2012; BAZYARI et al., 2014; ELDIN; ABD-ELHADY; KANDIL, 2016; VIEIRA et al., 2016; BARBOSA, 2016; HAMMAD et al., 2017; SUMATHI et al., 2017) identificaram que há diferenças na produção de energia elétrica entre os sistemas, porém não avaliaram de forma estatística se essas eram significativas.

É importante ressaltar que os dados do clima considerados para simular a produção de energia e,

em seguida, analisar as diferenças entre os sistemas foram obtidos a partir de um Ano Meteorológico Tipo, disponível no *software* SAM. O Ano Meteorológico Tipo consiste na determinação estatística de meses individuais que melhor representam as condições meteorológicas da região e tomam como base climatológica um período de vários anos. Esse procedimento é bastante utilizado em projetos de exploração da energia solar.

3.4 Análise financeira

Na Tabela 3, é apresentado um resumo das principais estimativas dos indicadores financeiros, avaliados neste trabalho, para os sistemas fotovoltaicos dimensionados no Campus Cajazeiras. Os resultados da análise financeira, para ambos os sistemas, indicam que os projetos são rentáveis, pois o VPL é positivo, a TIR é superior à taxa de desconto de 10,7%, o *payback* descontado é inferior ao tempo de vida útil do sistema

e o LCOE é inferior à tarifa da distribuidora de energia elétrica. O custo estimado para o sistema fotovoltaico fixo foi de R\$ 502.350,00 e, para o sistema equipado com seguidor, R\$ 713.525,00. É importante informar que o custo da troca de inversores para o período de vida útil foi o mesmo para os dois sistemas e já está incluso nos valores apresentados.

Tabela 3 – Estimativa dos parâmetros econômicos dos sistemas fotovoltaicos fixo e com seguidor

Indicadores financeiros	Sistema fotovoltaico	
	Fixo	Seguidor
VPL (R\$)	305.117,00	315.360,00
TIR (%)	16,30%	14,80%
Payback descontado (anos)	7,2	8,0
LCOE (R\$)	0,21	0,23
Custo do sistema (R\$)	502.350,00	713.525,00

Fonte: Dados da pesquisa

Ao avaliar o VPL para os dois sistemas, observa-se que o do sistema equipado com seguidor é um pouco superior (R\$ 315.360,00) ao do fixo (R\$ 305.117,00), uma diferença de apenas 3% a mais, porém com um investimento inicial 42% superior. Dessa forma, nesse indicador, o sistema fixo é mais viável, pois, com um investimento inferior, o VPL é basicamente o mesmo do sistema com seguidor.

O tempo estimado de retorno do investimento para os sistemas fotovoltaicos foi de 7,2 anos para o sistema fixo e 8,0 anos para o sistema com seguidor (Tabela 3). Representando o período em meses, o sistema fixo precisaria de 86,4 meses e o seguidor, de 96 meses – uma diferença de 9,6 meses. Essa diferença em meses é próxima aos resultados encontrados por Hammad *et al.* (2017) quando compararam de forma experimental dois sistemas fotovoltaicos (fixo e com seguidor) instalados na Universidade Hashemite, Zarqa, na Jordânia. Os autores verificaram que o sistema com seguidor demorava 7 meses a mais que o sistema fixo para obter retorno financeiro. O período de retorno do investimento para sistemas fotovoltaicos fixos estimado para o Campus Cajazeiras também está próximo ao resultado estimado (5,4 anos) pela Nota Técnica nº 56/2017, da ANEEL, para distribuidora de energia local na Paraíba (ANEEL, 2017). Portanto, com um investimento menor e um retorno mais rápido, o sistema fixo tende a ser mais viável.

Ao comparar a Taxa Interna de Retorno (TIR), apresentada na Tabela 3, com a taxa de desconto

de 10,7%, considerada neste trabalho, observou-se que os dois sistemas fotovoltaicos são projetos com investimentos viáveis. No entanto, o sistema fixo possui uma maior rentabilidade, com TIR de 16,3%, em detrimento do sistema com seguidor (14,8%), já que, quanto maior a diferença entre a taxa de desconto e a TIR, melhor será o investimento.

Os custos da energia elétrica (LCOE) produzida pelos sistemas fotovoltaicos simulados são inferiores ao valor da tarifa paga atualmente pelo instituto (R\$ 0,32). Verificou-se também que o custo de energia elétrica para o sistema fixo (R\$ 0,21) é mais baixo que o do sistema com seguidor (R\$ 0,23), aproximadamente 9% a menos, indicando que instalar de forma fixa um sistema fotovoltaico é mais econômico para este estudo de caso. Vale lembrar que já estão inclusos, nos valores do LCOE, os custos de manutenção e a operação, o fator de degradação dos sistemas e a troca de inversores para vida útil do sistema.

Diante de todos os indicadores financeiros discutidos, verifica-se que o sistema com seguidor solar é menos viável financeiramente neste estudo de caso. Para esse sistema, a TIR é menor, o *payback* descontado é maior, o VPL é apenas 3% superior ao investido no sistema fixo, porém com investimento inicial 42% maior, e o custo da energia elétrica supera em 9% o custo para sistemas fixos. O estudo de viabilidade econômica de Hammad *et al.* (2017) também encontra resultados financeiros próximos aos apresentados neste trabalho, mesmo se tratando de tamanhos de sistema distintos. É importante lembrar que os resultados da Tabela 3 são conservadores, pois não consideraram a incidência da bandeira tarifária nos custos de energia elétrica, o que poderia reforçar a viabilidade dos sistemas. Evitou-se a inclusão desse fator por não ser possível prever quando ocorre incidência durante o ano. Desse modo, os resultados são consistentes e, em caso de erros com a aplicação dessa bandeira, isso favorecerá os indicadores financeiros.

Os resultados encontrados neste trabalho estão de acordo com os discutidos em Drury *et al.* (2014), que avaliam que os projetos de sistemas fotovoltaicos com seguidor ainda possuem custos mais altos do que os de sistemas fixos devido aos valores adicionais de manutenção e operação, mecanismos e controladores para rastreamento, entre outros fatores, pressupostos também discutidos em Hammad *et al.* (2017).

Nessa mesma perspectiva, Vergura e Lameira (2011) e Bianchini *et al.* (2016) chamam a atenção para

o fato de a viabilidade dos sistemas com seguidor ser altamente dependente das políticas fiscais e tarifárias, além dos custos iniciais adicionais ao sistema. Para Mousazadeh *et al.* (2009), não é recomendado o uso de seguidores em sistemas fotovoltaicos de pequeno porte, visto que, além de um investimento maior, há uma perda de energia no acionamento dos sistemas de rastreamento.

Como já discutido anteriormente, os dois sistemas fotovoltaicos possuem viabilidade financeira em relação à energia comprada da distribuidora, mas o sistema instalado de forma fixa é mais viável financeiramente. Sendo assim, ao avaliar de forma independente a instalação desse sistema fixo no IFPB Campus Cajazeiras, verifica-se uma redução anual de 41,7% no consumo fora de ponta, o que equivale a R\$ 58.286,59 para o custo de energia elétrica atual, de R\$ 0,32 por kWh. A redução dos gastos com energia elétrica seria de grande importância para o *campus* analisado, visto que, atualmente, a conta de energia é uma parte considerável das despesas – cerca de R\$ 470.000 anuais, aproximadamente 10% do orçamento total do *campus*.

Os trabalhos de Sahoo *et al.* (2015), Lee *et al.* (2016), Tan e Chow (2016) e Al-Najideen e Alwashdeh (2017) analisaram sistemas fotovoltaicos instalados em instituições de ensino e todos demonstraram viabilidade financeira, além de darem ênfase a outros aspectos positivos da instalação desses sistemas. Por exemplo, Lee *et al.* (2016) relatam que os sistemas fotovoltaicos instalados em *campi* universitários não só reduzem despesas com energia elétrica, mas também podem ser usados como uma ferramenta efetiva para elevar o nível de conscientização da maior parte da comunidade acadêmica em relação às energias renováveis e a esforços sustentáveis em geral. Os autores ainda afirmam que os alunos, ao concluírem os cursos, começarão a tomar decisões onde vivem e trabalham e que a exposição às energias renováveis durante o ensino pode alterar suas percepções e expectativas, gerando impactos futuros.

4 Considerações finais

Este trabalho teve por objetivo realizar um estudo comparativo de sistemas fotovoltaicos fixo e com seguidor solar por meio da avaliação da viabilidade técnico-financeira em uma instituição pública de ensino localizada no sertão do estado da Paraíba. O desenvolvimento deste estudo possibilitou a avaliação das diferenças financeiras, estatísticas e de produção

de energia entre os sistemas. Constatou-se que o sistema equipado com seguidor solar produz 32% a mais de energia elétrica durante o ano do que o sistema fixo; logo, é mais efetivo na captação da energia solar. Além disso, comprovou-se por meio de teste estatístico (teste t) que a diferença de produção de energia elétrica pelos sistemas é estatisticamente significativa, ou seja, há evidências de que o sistema com seguidor produz mais energia do que o sistema fixo.

Verificou-se, na avaliação financeira, que todos os indicadores são mais atrativos para o sistema fixo em relação ao com seguidor, visto que aquele possui um retorno do investimento mais rápido, uma TIR maior, um VPL praticamente igual e um custo de energia elétrica menor. Outro fato é que o sistema fotovoltaico com seguidor tem um investimento inicial 42% superior ao sistema fixo. Dessa forma, apesar de o sistema equipado com seguidor solar ter melhor desempenho anual, isso não foi suficiente para gerar uma viabilidade financeira melhor, pois, com a tecnologia disponível atualmente, os custos de implementação, operação e manutenção ainda são elevados para utilização desse tipo de sistema. Talvez em um futuro próximo e com o desenvolvimento tecnológico, os sistemas com seguidores solares poderão ter custos menores de implementação e manutenção. Sendo assim, na análise de viabilidade dos sistemas fotovoltaicos, o sistema fixo mostrou-se mais viável do que o sistema com seguidor solar para instalação na instituição avaliada, pelo fato de requerer um investimento menor e possuir indicadores financeiros melhores.

O estudo traz como contribuição um melhor entendimento sobre as diferenças entre sistemas equipados com seguidores solares e com estruturas fixas, além de auxiliar na tomada de decisão acerca da instalação desses sistemas pela instituição analisada. Os resultados e a metodologia poderão também auxiliar outras instituições, residências e empresas da região que tenham interesse em instalar sistemas fotovoltaicos, visto que foi realizada análise de recurso solar e da viabilidade financeira, além de estimada a produção de energia elétrica desses sistemas na região.

Conclui-se, a partir dos resultados, que a instalação de sistemas fotovoltaicos no Campus Cajazeiras poderá gerar economia de gastos com energia elétrica. Os valores economizados podem ser revertidos pela instituição de ensino em investimentos em pesquisa, extensão e capacitação de alunos e professores. Além disso, o *campus* poderá contribuir para a preservação

do meio ambiente, já que a geração de energia por meio desses sistemas não acarreta emissões de poluentes nem de gases do efeito estufa, algo que agrega benefícios em escala local e global.

Como sugestão para estudos futuros, deve-se realizar um estudo experimental no sertão do estado da Paraíba, com a finalidade de comparar um sistema fotovoltaico fixo com outro equipado com seguidor solar por um período de um ano, analisando os aspectos técnicos, financeiros e estatísticos dos sistemas. Além deste, estudos interessados em analisar as diferenças entre os resultados gerados em *softwares* de simulação e resultados reais obtidos de sistemas fotovoltaicos em funcionamento são igualmente recomendados.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, DF: ANEEL, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Altera a resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Brasília, DF: ANEEL, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Nota Técnica nº 56, de 24 de maio de 2017**. Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024. Brasília, DF: ANEEL, 2017. 26 p.

AL-NAJIDEEN, M. I.; ALRWASHDEH, S. S. Design of a solar photovoltaic system to cover the electricity demand for the faculty of Engineering- Mu'tah University in Jordan. **Resource-Efficient Technologies**, v. 3, n. 4, p. 440-445, 2017. DOI 10.1016/j.reffit.2017.04.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405653717300350>. Acesso: 10 out. 2018.

BAHRAMI, A.; OKOYE, C. O.; ATIKOL, U. The effect of latitude on the performance of different solar trackers in Europe and Africa. **Applied Energy**, v. 177, p. 896-906, 2016. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.05.103. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916307085>. Acesso em: 6 maio 2018.

BAKHSHI, R.; SADEH, J. A comprehensive economic analysis method for selecting the PV array structure in grid-connected photovoltaic systems. **Renewable Energy**, v. 94, p. 524-536, 2016. DOI 10.1016/j.renene.2016.03.091. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116302750>. Acesso em: 9 jun. 2018.

BARBOSA, D. A. **Análise energética e financeira de um dispositivo de seguimento para geração fotovoltaica**. 2016. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

BAZYARI, S. *et al.* A study on the effects of solar tracking systems on the performance of photovoltaic power plants. **Journal of Power and Energy Engineering**, v. 2, n. 4, p. 718-728, 2014. DOI 10.4236/jpee.2014.24096. Disponível em: http://file.scirp.org/pdf/JPEE_2014050814004447.pdf. Acesso em: 5 dez. 2017.

BIANCHINI, A. *et al.* Performance analysis and economic assessment of different photovoltaic technologies based on experimental measurements. **Renewable Energy**, v. 85, p. 1-11, 2016. DOI 10.1016/j.renene.2015.06.017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115300392>. Acesso em: 5 dez. 2017.

BRASIL. Ministério da Educação. **Anuário da eficiência do gasto público com água e energia elétrica nas instituições federais de ensino: ano de 2015**. Desafio da Sustentabilidade. Brasília, DF: MEC, 2015a.

BRASIL. **Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000**. Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2000.

BRASIL. **Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001**. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2001.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão. **Boletins de despesas de custeio administrativo**. Brasília, DF: MPGD, 2016. Disponível em: <http://www.planejamento.gov.br/servicos/central-de-conteudos/boletim-de-custeio-administrativo>. Acesso em: 18 mar. 2017.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Portaria Nº 23, de 12 de fevereiro de 2015**. Estabelece boas práticas de gestão e uso de

energia elétrica e de água nos órgãos e entidades da Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional e dispõe sobre o monitoramento de consumo desses bens e serviços. Brasília, DF: MPOG, 2015b.

COGEN – ASSOCIAÇÃO DA INDÚSTRIA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA. **Inserção da Energia Solar no Brasil: Relatório Final GT COGEN SOLAR.** São Paulo: COGEN, 2012. Disponível em: http://www.cogen.com.br/content/upload/1/documentos/Solar/Biblioteca_Virtual/Relatorio_Final_GT_COGEN_SOLAR.pdf. Acesso em: 5 jun. 2018.

DRURY, E. *et al.* Relative performance of tracking versus fixed tilt photovoltaic systems in the USA. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 22, n. 12, p. 1302-1315, 2014. DOI 10.1002/pip.2373. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.2373>. Acesso em: 10 jun. 2018.

EKE, R.; SENTURK, A. Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system. **Solar Energy**, v. 86, n. 9, p. 2665-2672, 2012. DOI 10.1016/j.solener.2012.06.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X12002174>. Acesso em: 10 maio 2018.

ELDIN, S. A. S.; ABD-ELHADY, M. S.; KANDIL, H. A. Feasibility of solar tracking systems for PV panels in hot and cold regions. **Renewable Energy**, v. 85, p. 228-233, 2016. DOI 10.1016/j.renene.2015.06.051. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115300744>. Acesso em: 22 abr. 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Expansão da Geração: 1º Leilão de Energia de Reserva de 2015.** Participação dos Empreendimentos Solares Fotovoltaicos: Visão Geral. Brasília, DF: EPE, 2015a.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Expansão da Geração: 2º Leilão de Energia Reserva de 2015.** Participação dos Empreendimentos Solares Fotovoltaicos: Visão Geral. Brasília, DF: EPE, 2015b.

GREENER TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS. **Análise estratégica: mercado fotovoltaico de geração distribuída – 1º semestre/2018.** Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo-estrategico-mercado-fotovoltaico-de-geracao-distribuida-1o-semestre2018/>. Acesso em: 28 fev. 2018.

HAMMAD, B. *et al.* Performance and economic comparison of fixed and tracking photovoltaic systems in Jordan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 827-839, 2017. DOI 10.1016/j.rser.2017.05.241. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117308936>. Acesso em: 14 maio 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Technology roadmap: solar photovoltaic energy.** Paris: International Energy Agency, 2014. Disponível em: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf. Acesso em: 16 jun. 2017.

JORDAN, D. C.; KURTZ, S. R. Photovoltaic degradation rates: an analytical review. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 21, n. 1, p. 12-29, 2013. DOI 10.1002/pip.1182. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.1182>. Acesso em: 15 mar. 2017.

KALOGIROU, S. A. **Solar energy engineering: processes and systems.** 2. ed. Waltham, MA, EUA: Academic Press, 2013.

KEBEDE, K. Y. Viability study of grid-connected solar PV system in Ethiopia. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 10, p. 63-70, 2015. DOI 10.1016/j.seta.2015.02.003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221313881500017X>. Acesso em: 25 abr. 2017.

LEE, J. *et al.* Economic feasibility of campus-wide photovoltaic systems in New England. **Renewable Energy**, v. 99, p. 452-464, 2016. DOI 10.1016/j.renene.2016.07.009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811630605X>. Acesso em: 21 set. 2017.

LIMA, B. W. F. **Geração distribuída aplicada à edificações: edifícios de energia zero e o caso do laboratório de ensino da FEC-Unicamp.** 2012. 170 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

MAYER, J. N. *et al.* **Current and future cost of photovoltaics: long-term scenarios for market development, system prices and LCOE of utility-scale PV systems.** Freiburg (Germany): Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2015.

MOUSAZADEH, H. *et al.* A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems

output. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 8, p. 1800-1818, 2009. DOI 10.1016/j.rser.2009.01.022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032109000318>. Acesso em: 10 maio 2017.

NAKABAYASHI, R. K. **Microgeração fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas futuras**. 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY – NREL. **System Advisor Model (SAM)**. 2017. Disponível em: <https://sam.nrel.gov/>. Acesso em: 2 fev. 2017.

NÓBREGA, B. S. *et al.* Desempenho de um sistema solar fotovoltaico com diferentes inclinações e orientações azimutais em cidades da Paraíba. **Revista Principia – Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, n. 43, p. 175-188, 2018. DOI 10.18265/1517-03062015v1n43p175-188. Disponível em: <http://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/1950>. Acesso em: 17 fev. 2019.

OLIVEIRA, C. A. A. **Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias**. 2007. 64 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88 p.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (orgs.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2014. 530 p.

SAHOO, A. K. *et al.* Feasibility study of microgrid installation in an educational institution with Grid Uncertainty. **Procedia Computer Science**, v. 70, p. 550-557, 2015. DOI 10.1016/j.procs.2015.10.099. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915032639>. Acesso em: 10 maio 2017.

SAWIN, J. L. *et al.* Renewable Energy Policy Network for the 21st Century: **Renewables 2018 Global Status Report**. Paris, France: REN21 Secretariat, 2018.

SCHMALENSEE, R. *et al.* **The future of solar energy: an interdisciplinary MIT study**. Cambridge, MA, EUA: Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2015. (MIT Future of Series). ISBN 978-0-928008-9-8.

SUMATHI, V. *et al.* Solar tracking methods to maximize PV system output: a review of the methods adopted in recent decade. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 130-138, 2017. DOI 10.1016/j.rser.2017.02.013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117302162>. Acesso em: 25 jan. 2018.

TAN, R. H. G.; CHOW, T. L. A Comparative study of feed in tariff and net metering for UCSI University North Wing campus with 100 kW solar photovoltaic system. **Energy Procedia**, v. 100, p. 86-91, 2016. DOI 10.1016/j.egypro.2016.10.136. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216310979>. Acesso em: 15 maio 2017.

TOLMASQUIM, M. T. (coord.). **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016. 452 p.

TORMAN, V. B. L.; COSTER, R.; RIBOLDI, J. Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. **Revista HCPA**, Porto Alegre, v. 32, n. 2, p. 227-234, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/158102>. Acesso em: 10 maio 2017.

VERGURA, S.; LAMEIRA, V. J. Technical-financial comparison between a PV plant and a CSP plant. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**, v. 6, n. 2, p. 210-220, 2011. DOI 10.7177/sg.2011.v6.n2.a9. Disponível em: <http://www.revistasg.uff.br/index.php/sg/article/download/V6N2A9/V6N2A9>. Acesso em: 12 jun. 2017.

VIANA, T. S. *et al.* Sistema fotovoltaico de 2kWp integrado a edificação: análise do desempenho de 14 anos de operação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (CBENS), 4.; CONFERÊNCIA LATINO AMERICANA DA INTERNATIONAL SOLAR ENERGY SOCIETY (ISES), 5., 2012, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo: Associação Brasileira de Energia Solar (ABENS), 2012.

VIEIRA, R. G. *et al.* Comparative performance analysis between static solar panels and single-axis tracking system on a hot climate region near to the equator. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 64, p. 672-681, 2016. DOI 10.1016/j.rser.2016.06.089. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116303148>. Acesso em: 8 dez. 2017.