

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO - UM ESTUDO DE CASO EM UMA INSTITUIÇÃO DE ENSINO PÚBLICA DE GOVERNADOR VALADARES

André Eve de Mello Ramos (*), Valcimar Silva de Andrade

* Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Governador Valadares - andreeve@hotmail.com

RESUMO

O aproveitamento da radiação solar para geração de energia elétrica, através do efeito fotovoltaico, sofreu significativo incremento com o advento dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR) e a crescente demanda energética. O cenário de emergência dos SFVCRs, o aumento de tarifas de energia e a questão da sustentabilidade levaram o IFMG - Campus Governador Valadares a realizar, em 2014, um estudo de viabilidade técnica e econômica como preparativo para aquisição de uma usina solar fotovoltaica. Após esse estudo e com a disponibilidade financeira foi possível a aquisição de uma usina fotovoltaica conectada à rede de 28,6 kWp (microgeração distribuída) em setembro de 2016. Com o intuito de analisar o desempenho da usina, foi feito estudo considerando algumas metodologias disponíveis na literatura que expressam a produtividade da mesma, assim como uma correlação linear entre energia radiante disponível e geração de energia elétrica, e a análise financeira do retorno econômico em função da energia gerada (não consumida da rede da concessionária). Foram utilizados para análise da produtividade do sistema os seguintes parâmetros: Índice de Produtividade, Taxa de Desempenho e Fator de Capacidade. Toda a análise foi feita considerando o período entre setembro de 2016 e julho de 2018. Os resultados do índice de produtividade mostram um perfil com variação na geração ao longo do ano e valores médio de 80 kWh/kWp, dentro do hall de valores encontrados na literatura. A taxa de desempenho ficou em torno de 70%, e na literatura os valores se situam entre 70 e 85%. O fator de capacidade encontrado ficou entre 12 e 17%, o que também está em conformidade com valores encontrados na literatura, embora alguns meses apresentem anomalias. A correlação entre energia radiante disponível no plano dos painéis e a energia elétrica gerada foi considerada alta (maior que 0,70), se eliminados os meses de testes e falhas no sistema. Por fim a análise financeira do retorno provocado com a geração de energia, levando em conta as tarifas da concessionária, ICMS e inflação (IGP-M), dão conta que já foram retornados cerca de 19% do valor investido, e mantido o ritmo de retorno o investimento total será recuperado em cerca de 10 anos. Os resultados são considerados satisfatórios, mas o acompanhamento constante dos índices pode levar a melhoria da geração, como o caso de limpeza em intervalos de tempo adequados e/ou identificação de possíveis falhas nos constituintes do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Geração Distribuída, Energia Fotovoltaica, Sistemas Conectados, Análise de Desempenho.

INTRODUÇÃO

A importância da radiação solar para o planeta e a atividade humana pode ser percebida em diversas situações, desde o importante processo de fotossíntese, responsável direto na nutrição dos vegetais, passando pela dinâmica da atmosfera e do clima, até o aproveitamento energético. Este último tem ganhado grande atenção e investimento pelo aumento da demanda energética mundial e a necessidade premente de fontes de energia renováveis e mais limpas. Em termos de aproveitamento energético, podemos ter a conversão de energia solar em calor, com uso direto ou posterior conversão em energia elétrica, e a conversão fotovoltaica, que transforma a energia da radiação solar incidente em energia elétrica de forma direta, graças ao efeito fotovoltaico.

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839, através da descoberta do físico Edmond Becquerel (1822-1891), que expondo à luz dois eletrodos metálicos imersos em uma solução química, percebeu um efeito que dava origem a uma corrente elétrica. Na ocasião desta importante descoberta o aproveitamento energético na conversão da radiação solar em energia elétrica não alcançou resultados satisfatórios, com apenas 1% de rendimento. Tal estudo desencadeou uma importante base para avançar na produção e geração de energia solar fotovoltaica. Seu primeiro grande emprego tecnológico foi na exploração espacial e sistemas remotos para suprimento de energia (uso militar, transmissão de sinais de telecomunicações, etc.). Atualmente o desenvolvimento de painéis fotovoltaicos com rendimentos efetivos, da ordem de 9% a 17%, a redução de custos, uma maior demanda energética e a busca por sustentabilidade tem possibilitado maior exploração da energia fotovoltaica [9].

Basicamente existem dois tipos de sistemas de geração de energia fotovoltaica, o primeiro e mais antigo é o chamado sistema fotovoltaico isolado (SFVI), que corresponde aos sistemas que ao converterem a energia da radiação em energia elétrica armazena a mesma em banco de baterias, de modo que a energia possa ser usada em uma dada carga, seja ela em corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA). O sistema emergente, em parte pelo avanço das tecnologias de eletrônica de potência, é o sistema fotovoltaico conectado à rede (SFVCR), que como o próprio nome sugere, se refere aos sistemas que não carecem de armazenamento da energia. Nestes sistemas a energia gerada é instantaneamente

consumida, seja pela rede interna (carga da edificação onde o sistema está instalado) ou pela rede da concessionária de energia. Para sistemas conectados, geração distribuída, são necessários equipamentos e correto projeto, além de legislação, para que seja feita a conexão do sistema com a rede da concessionária [5,10]. O surgimento dos SFVCRs desencadeou a busca por instalações fotovoltaicas em diversos locais, tendo em vista custos mais baixos frente aos sistemas isolados, e o aproveitamento da incidência solar (índice solarimétrico) e áreas de cobertura ociosas nas edificações.

Em termos de Brasil, a diversificação da matriz energética, a busca por energia sustentável e limpa, as altas tarifas de energia elétrica e a aprovação da resolução 482/2012 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) em 2012, deu início a um processo de implantação de vários sistemas de geração distribuída com tecnologia solar fotovoltaica pelo país. Fundamentando-se nesta inserção crescente da energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira e em experiências já existentes de uso de sistemas fotovoltaicos para bibliotecas, escolas, estádios de futebol e outras instalações, o IFMG - *Campus* Governador Valadares fez, em 2014, um levantamento da viabilidade técnica e econômica de um sistema fotovoltaico para alimentação de seu prédio de ensino. Foram feitos levantamentos de índice solarimétrico da região de instalação do sistema, estimativa da carga do prédio (consumo de energia), análise de possíveis locais de instalação, dimensionamento do sistema fotovoltaico e análise de viabilidade econômica [6]. O objetivo do levantamento era dar subsídios aos gestores para futura instalação de um sistema de geração distribuída com tecnologia solar fotovoltaica, observando as oportunidades de redução de custos com energia elétrica, sustentabilidade e o ensino (Curso Técnico em Meio Ambiente, Tecnólogo em Gestão Ambiental e Engenharia Ambiental).

No ano de 2016 o Instituto Federal da Minas Gerais (IFMG) conseguiu recursos para instalação de sistemas fotovoltaicos conectados, e em função de seus estudos prévios e índice solarimétrico local, o *Campus* Governador Valadares foi um dos escolhidos para a instalação. O presente trabalho diz respeito a um estudo de desempenho da usina fotovoltaica instalada no IFMG - *Campus* Governador Valadares (28,6 kWp, 110 painéis e 176 m² de área).

OBJETIVOS

Com o maior domínio da tecnologia fotovoltaica, a redução de custos, regulamentação da geração distribuída e a demanda crescente de energia, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica tem se expandido consideravelmente no Brasil. Parte dessa expansão se deve também a questões relativas ao desenvolvimento sustentável, uma vez que a energia solar fotovoltaica é considerada limpa [4,8].

Como dito, os sistemas de geração fotovoltaica podem ser encontrados de duas formas distintas: isolados (SFVI) ou conectados à rede elétrica (SFVCR). Sendo que estes últimos mais atrativos para uma geração em larga escala. Estes sistemas só puderam começar a ser instalados no Brasil a partir da publicação da resolução nº 482/2012 da ANEEL, que definiu as formas de acesso a rede e os detalhes para liberação da conexão. Essa regulamentação básica, que deve passar por revisão já em 2019, foi um passo importante para avanços na diversificação da matriz elétrica brasileira, uma vez que os sistemas fotovoltaicos contribuem para ampliação da capacidade de geração distribuída. Segundo dados da Associação Brasileira de Geração Distribuída (ABGD) há um potencial de crescimento de 800.000 unidades até 2026 e 32% da matriz energética brasileira será composta pela energia solar fotovoltaica em 2040 [1].

O presente trabalho buscou realizar um estudo de desempenho da usina fotovoltaica no IFMG *Campus* Governador Valadares (S 18°51' 4" e O 41° 56' 57"), cuja potência é de 28,6 kWp, distribuída por 110 painéis, em 176 m² de área. Além de aproveitar espaço ocioso na cobertura do prédio administrativo da unidade e o grande potencial solarimétrico na região (5,5 kWh/m²) para redução da demanda de energia drenada da concessionária, o projeto também visa viabilizar a sustentabilidade, pesquisa e o ensino.

A realização do estudo de desempenho tem como objetivo o acompanhamento da geração, para comparação com as estimativas iniciais (projeto), análise do retorno financeiro em termos de redução de demanda de energia e uma comparação com os sistemas disponíveis comercialmente. Além disso, busca-se analisar eventuais problemas com o sistema, o que pode influenciar na questão da manutenção (preventiva/corretiva), e ainda a influência da disponibilidade de radiação ao longo do ano.

METODOLOGIA

Apesar de não existir, via regulamentação, uma metodologia específica para análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados a rede, foi possível encontrar na literatura algumas metodologias que cumprem bem esse papel [2,7,9]. Foram utilizados inicialmente índices que são conhecidos como índices de mérito: *Yield*, *Performance Ratio* e *Fator de Capacidade* [2].

Também conhecido como índice de produtividade, o Yield é um dos mais intuitivos índices de mérito para comparação de diferentes sistemas. Basicamente é a relação da energia gerada (kWh) em um determinado período, geralmente um ano, e a potência instalada (kWp) do sistema fotovoltaico. Importante observar os efeitos de localidade, inclinação e sombreamento sobre esse índice. Dessa forma é interessante analisar se as condições de operação não foram por demais diferentes, pois isso poderá atribuir, erroneamente um índice de mérito comparativamente maior ou menor (dependendo da circunstância). [2]

$$\text{ÍNDICE DE PRODUTIVIDADE} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kWp}} \right) = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Potência Instalada}} = \frac{\int_0^{720} P(t) dt}{P_N}$$

P(t) é a potência do sistema num dado instante, em kW

P_N é a potência nominal do sistema, em kWp

t é o tempo de funcionamento, em horas.

A Taxa de Desempenho ou Performance Ratio é uma razão que envolve o índice de produtividade (kWh/kWp) e a quantidade de horas de sol a 1.000 W/m² (condição padrão) incidentes no painel fotovoltaico. Também é normalmente feita no intervalo de um ano de operação. Este índice também indica o desempenho descontando as perdas existentes no sistema (perdas nos inversores, nas conexões, nos cabos e principalmente perdas devido à elevação de temperatura dos módulos), pois relaciona a energia elétrica na saída com a radiação disponível ao longo do ano. [2]

$$\text{TAXA DE DESEMPENHO (\%)} = \frac{\text{ÍNDICE DE PRODUTIVIDADE}}{\text{IRRADIAÇÃO / 1000}}$$

O fator de capacidade é um índice que representa a capacidade de gerar energia elétrica sobre a energia nominal em um intervalo de tempo (potência nominal x tempo), normalmente em um ano. É um índice que permite a comparação da energia solar fotovoltaica com outras fontes (eólica, hidroelétrica, etc.), e em geral a energia solar tem fatores típicos de 12 a 18 % [7]. É possível perceber que há uma relação direta entre o fator de capacidade e a produtividade, obtendo-se o valor da produtividade obtém-se o valor do fator de capacidade [2].

$$\text{FATOR CAPACIDADE (\%)} = \frac{\text{ENERGIA GERADA}}{\text{POTÊNCIA NOMINAL . TEMPO}}$$

Por fim e tendo em vista a contribuição deste trabalho para a área de energia solar fotovoltaica, foram feitas análises da economia monetária com tarifa de energia, uma correlação entre geração e disponibilidade de radiação (medida com auxílio de uma estação meteorológica) e um levantamento de falhas ocorridas na operação. Um eventual índice de falhas permitirá o aperfeiçoamento das normas e dos aspectos de construção dos sistemas.

RESULTADOS

Antes de efetuar os cálculos que levaram a determinação dos índices de desempenho o primeiro passo foi a caracterização do sistema instalado, que possui 28,6 kWp distribuídos em 110 painéis com 0,26 kWp e 1,608 m² de área. A inclinação relativa ao plano horizontal é de 18° (igual a latitude da cidade). A figura 1 mostra uma foto do sistema instalado (a) e a disposição sobre o prédio administrativo (painéis voltado ao norte) (b). Nos estudos iniciais



Figura 1 - (a) Fotografia do sistema fotovoltaico instalado (b) Vista aérea do telhado do prédio administrativo com o detalhe da localização do sistema.

Um primeiro levantamento foi o perfil de geração do sistema desde o início de sua operação em setembro de 2016. O gráfico 1 mostra o perfil da geração (kWh) em cada mês ao longo dos anos de operação da usina. É importante observar que no mês de setembro de 2016 foram realizados alguns testes, o que levou ao desligamento do sistema em alguns dias e consequente influência na geração do período. No mês de outubro do mesmo ano foi registrada a única falha do sistema, que também gerou desligamento do sistema por alguns dias. Esta falha foi gerada por problemas no barramento de conexão, não correspondendo a falha em painéis, inversor ou sistema de proteção.

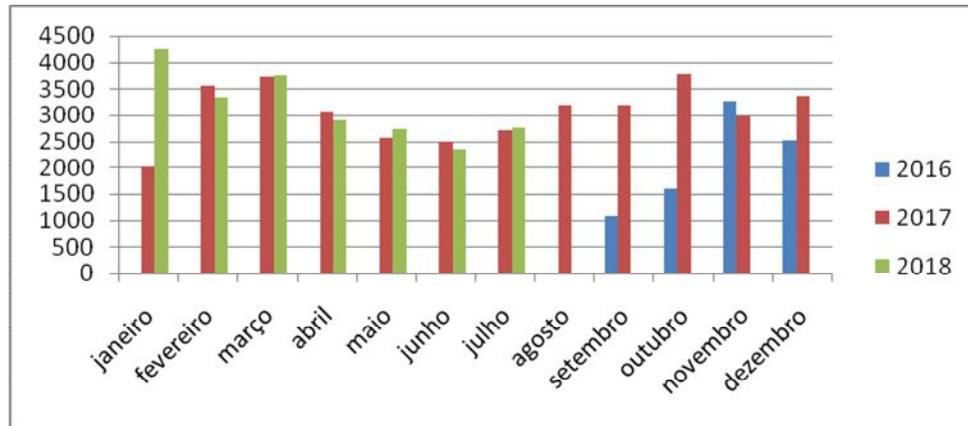


Gráfico 1 - Perfil da geração de energia (kWh) em cada ano.

O índice de produtividade (kWh/kWp) foi obtido mensalmente, justamente para se observar a variabilidade deste com a fase do ano. As condições climáticas e de eventual falha do sistema influenciam na produção e por consequência no índice. O gráfico 2 mostra os resultados para os índices de produtividade calculados. Assim como no caso da geração, são feitas as mesmas observações referentes aos meses de setembro e outubro de 2016. Observa-se um perfil com correlação direta com o perfil de geração.

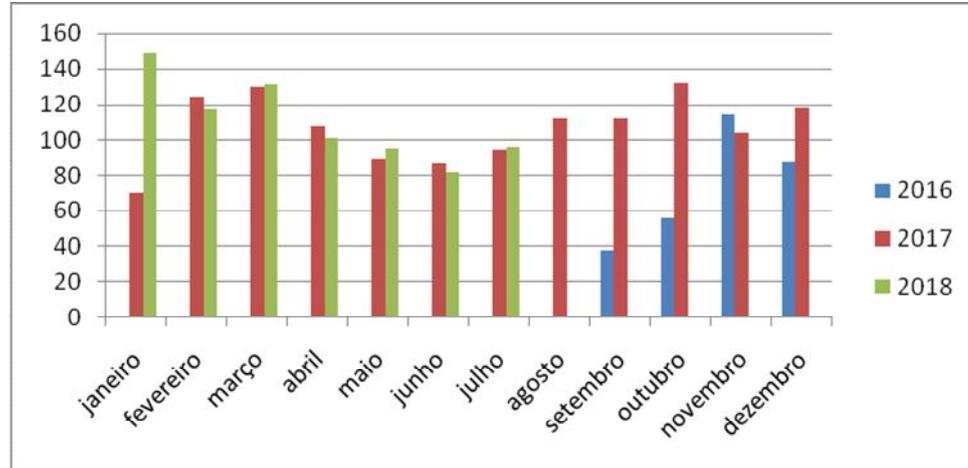


Gráfico 2 - Índice de produtividade do sistema (kWh/kWp)

A taxa de desempenho, calculada mensalmente, é expressa no gráfico 3, onde é possível observar que os valores relativos ao período janeiro a julho nos anos de 2017 e 2018 estão muito próximos, com exceção de janeiro. O ano de 2016 teve quatro meses onde foram feitos ajustes e registrou-se a ocorrência de falhas (setembro e outubro), o que evidentemente afetou a geração e o valor deste e dos demais índices. Extraídos os meses de setembro e outubro de 2016, e janeiro de 2017, o desempenho fica entre 55 e 90%. No caso de comparação apenas dos anos de 2017 e 2018, verifica-se desempenho acima de 60% e com média em torno dos 70%. Na literatura é possível observar taxas de desempenho da ordem de 70 a 85% [7]. Esse índice é importante para análise de eficiência geral do sistema, indicando possíveis perdas específicas, como as causadas pela sujeira sobre os painéis.

O gráfico 4 mostra os resultados do fator de capacidade, com valores mínimos de 12% em média e com valor máximo de 17%, o que coincide com valores típicos encontrados na literatura [7]. Novamente é possível observar a sazonalidade do fator de capacidade, fruto principalmente das condições de operação (radiação disponível, nebulosidade e temperatura dos painéis). As tabelas 1 e 2 mostram os resultados de radiação mensal (kWh/mês) em inclinação de 19°, geração mensal (kWh) e a correlação entre essas duas grandezas. Na tabela 2 há três correlações, a primeira considerando os dados anuais tais como apresentados na tabela 1, a segunda excluindo alguns dados (*) em função de

gerações atípicas, e por fim uma correlação de toda a série histórica. Sem correção dos dados atípicos é possível ver correlação negativa, e com a exclusão dos valores mencionados é possível verificar uma correlação forte ou muito forte.

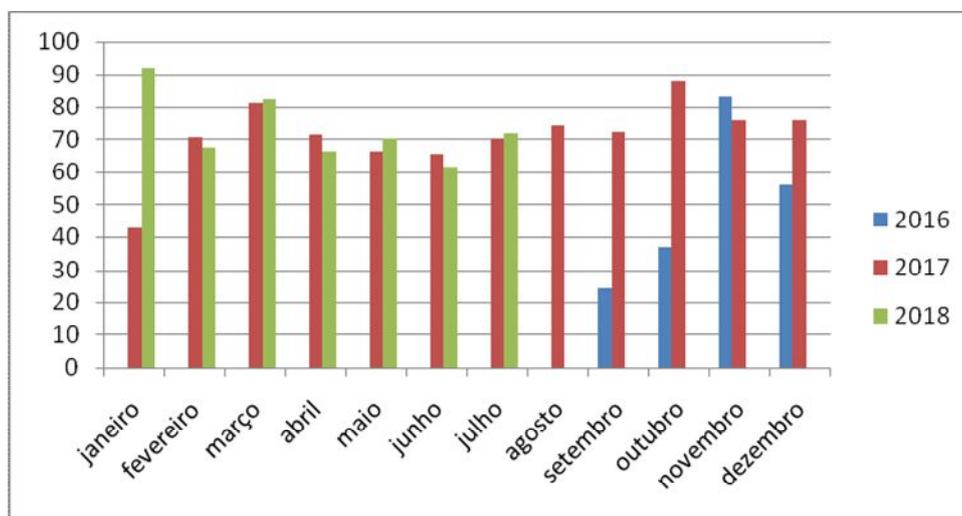


Gráfico 3 - Taxa de Desempenho (%) do sistema.

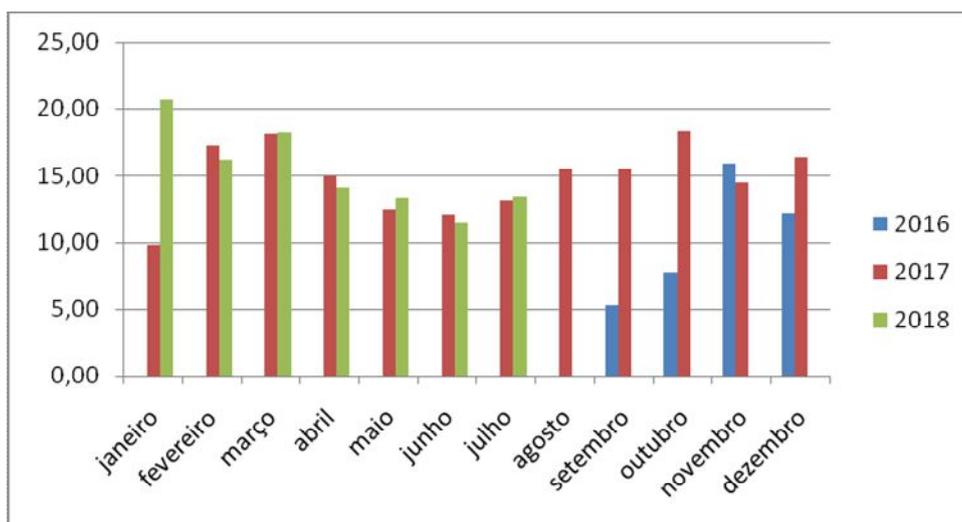


Gráfico 4 - Fator de Capacidade (%) do sistema

	Radiação Mensal (kWh/mês)			Geração (kWh)		
	2016	2017	2018	2016	2017	2018
janeiro	-	169,6	167,7	-	2008*	4263
fevereiro	-	175,5	173,4	-	3551	3338
março	-	165,5	164,9	-	3723	3751
abril	-	151,2	152,7	-	3083	2896
maio	-	140,4	141,1	-	2571	2733
junho	-	132,3	133,5	-	2483	2348
julho	-	139,2	139,2	-	2707	2757
agosto	-	150,9	-	-	3201	-
setembro	156,0	154,5	-	1092*	3192	-
outubro	156,9	155,0	-	1605*	3770	-
novembro	137,4	137,1	-	3267	2972	-
dezembro	162,1	161,2	-	2508	3371	-

Tabela 1 - Valores de radiação mensal (kWh/mês) e geração (kWh)

	2016	2017	2018
Correlação I	-0,62	0,38	0,85
Correlação II	-1,00	0,85	0,85

Correlação III	0,70
-----------------------	------

Tabela 2 - Correlações entre Geração e Radiação Mensal

De posse dos dados de compra da usina, que custou em 2016 cerca de R\$ 191.750,00, das tarifas de energia, da incidência de ICMS (18%) e do IGP-M do período (6,28%), foi possível estimar a economia monetária no período e o retorno sobre o capital investido. Em termos atuais o saldo devedor referente a compra da usina é de R\$ 203.791,00. O valor atualizado da economia com a energia, considerando o ICMS, é de R\$ 39.707,00. Dessa forma é possível perceber que em 23 meses cerca de 19% do valor investido já retornou como energia gerada, mantendo esse ritmo o retorno total ocorrerá em cerca de 10 anos. Com os atuais aumentos de tarifa, esse período de retorno deve cair.

CONCLUSÕES

Pelos resultados dos três índices (produtividade, taxa de desempenho, fator de capacidade) é possível perceber que os valores estão tipicamente dentro dos valores encontrados na literatura para os sistemas disponíveis no mercado, e percebe-se uma estabilização dos índices na comparação dos anos de 2017 e 2018. A produtividade média foi de cerca de 80 kWh/kWp, a taxa de desempenho entre 70 e 85%, e o fator de capacidade de 12 a 17%.

Sobre a correlação linear entre radiação disponível e geração é possível ver, excluídos os dados de gerações atípicas, que a correlação é forte (superior a 0,70). Pela natureza dessa correlação é possível perceber um fator que afeta a geração e não há controle algum sobre ele: as condições de clima e radiação. O sombreamento de nuvens e queda no valor de radiação incidente ocorrem em várias situações ao longo do ano.

A análise econômica apontou que cerca de 19% do valor investido na usina fotovoltaica já retornaram em função da energia que deixou de ser comprada da concessionária, levando em consideração a inflação do período (6,28%), ICMS (18%) e o valor pago pela usina: cerca de R\$ 191750,00. A incidência de ICMS leva em consideração o fato de que se a energia fosse comprada, seu custo carregaria a incidência desse imposto. No período de análise o kWh variou entre R\$ 0,45 e R\$ 0,55 (sem considerar impostos). A estimativa mostra que o tempo de retorno, mantido o ritmo de geração anula, é de cerca de 10,0 anos.

Até o momento o sistema apresentou apenas uma falha decorrente de erro de instalação no barramento de conexão com a rede trifásica. O problema deixou o sistema sem operar por alguns no mês de outubro 2016, sendo que no mês de setembro alguns dias ficaram sem geração em razão de testes. Além disso, registra-se apenas 3 limpezas dos painéis que foram feitas sem parada no sistema e sem um critério específico, diante dos índices de desempenho pode ser que um critério mais específico seja estabelecido.

O acompanhamento de desempenho da usina pelos índices aqui expostos continuará, para viabilizar tomadas de decisão sobre limpeza e necessidade de manutenção. Além disso, o acompanhamento permitirá monitorar a queda de rendimento do sistema em função de sua vida útil. Pretende-se, futuramente, fazer análise termográfica para detecção de possíveis painéis com células fotovoltaicas defeituosas e a instalação de um medidor de radiação no plano dos painéis instalados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABGD -ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA. Dados de Mercado 2018. Disponível em: <<https://www.geracaodistribuida.org/copia-mapa-do-mercado-2>>. Acesso em 04 de junho de 2018.
- [2] ALMEIDA, M. P. **Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. Dissertação de Mestrado. USP - São Paulo, 2012.
- [3] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N° 482**. 17 Abril, 2012.



- [4] CGEE – Centro de Gestão de Estudos Estratégicos. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: subsídios para tomada de decisão**. Brasília, DF, Maio, 2010.
- [5] COOK, Gary. BILLMAN, Lynn. ADOCOCK, Rick. **Photovoltaic Fundamentals**. Washington: US Department of Energy, 1995.
- [6] SANTANA, F. P. S; ANDRADE, V. S. **Dimensionamento e Análise de Viabilidade de um Sistema Fotovoltaico para o Prédio de Ensino de uma Instituição Pública em Governador Valadares**. V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. 2014.
- [7] SOBRINHO, J. E. *et al.* **Análise da eficiência de uma usina solar fotovoltaica em Mossoró - RN**. XX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia & V Simpósio de Mudanças Climáticas e Desertificação do Semiárido Brasileiro. Juazeiro-BA/Petrolina-PE, Brasil, 14 a 18 de agosto de 2017.
- [8] TOLMASQUIM, M. T. (coord). **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica** / Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord.). – EPE: Rio de Janeiro, 2016.452p.
- [9] URBANETZ JUNIOR, Jair; CASAGRANDE JUNIOR, Eloy; TIEPOLO, Gerson M. **Acompanhamento do desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do escritório verde da UTFPR**. IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. 2014a.
- [10] VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLLI, Jonass Rafael. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações – sistemas isolados e conectados à rede**. 1.ed. Editora: Érica Ltda. São Paulo, 2013.