

ANÁLISE DO DESEMPENHO DA USINA FOTOVOLTAICA DO IFMG CAMPUS AVANÇADO IPATINGA

José Henrique Ferreira de Souza¹; Mariana Campos Souza²; Willian Marlon Ferreira³; Alex de Andrade Fernandes⁴

1 José Henrique Ferreira de Souza, Engenharia Elétrica, IFMG, Ipatinga – MG

2 Mariana Campos Souza, Engenharia Elétrica, IFMG, Coronel Fabriciano – MG

3 Orientador: Pesquisador do IFMG, Campus Ipatinga; willian.ferreira@ifmg.edu.br

4 Co-Orientador: Pesquisador do IFMG, Campus Ipatinga; alex.andrade@ifmg.edu.br

RESUMO

O Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia na Terra, pois fornece a energia primária geradora das demais fontes (Ex: é responsável pelo ciclo da água utilizado na geração hídrica), mas a energia proveniente do Sol também pode ser convertida diretamente em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. A energia solar fotovoltaica ainda é relativamente pouco utilizada, mas está se tornando gradualmente mais competitiva. Os níveis de geração de energia elétrica dos módulos fotovoltaicos são irregulares, devido à própria variabilidade da irradiação solar, mas também devido a diversos fatores que causam perda de desempenho como temperatura, sombreamento causado pela poluição atmosférica e impurezas que se depositam sobre os módulos. Por isso, utilizam-se índices de mérito para avaliar o desempenho de uma usina solar fotovoltaica. Este trabalho tem por objetivo analisar o desempenho da usina fotovoltaica do Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Avançado Ipatinga ao longo de 13 meses, através do cálculo dos índices de mérito (fator *YIELD* e *Performance Ratio*) e pelo fator de perdas. Os parâmetros de entrada do modelo são: energia gerada no mês, potência instalada, quantidade de módulos, dados como potência no ponto de máxima potência, área dos módulos, temperatura nominal da célula nas condições de operação, coeficiente de temperatura para potência, coeficiente de temperatura para tensão, eficiência do inversor, bem como dados meteorológicos de irradiação e temperatura ambiente, além da inclinação e orientação dos módulos para o cálculo das horas de sol pleno (HSP). Os parâmetros de saída do modelo são os índices de mérito, bem como a geração real e estimada, além do fator de perdas. Os resultados encontrados são congruentes com o esperado. A geração teórica foi um pouco maior que a real, o que faz todo sentido já que o modelo utilizado não considera todos os tipos de perda de energia que podem ocorrer em um sistema fotovoltaico. Os índices de desempenho caíram um pouco com o tempo, ao passo que o fator de perdas aumentou, o que provavelmente se deve à sujidade dos módulos. Isso demonstra que esse tipo de monitoramento de desempenho pode ser muito útil para programar limpezas e manutenções em usinas fotovoltaicas.

Palavras-chave: Usinas Fotovoltaicas; Geração distribuída; Eficiência de geração.

INTRODUÇÃO:

O Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia na Terra: hídrica, eólica, fóssil, entre outras (Ex: é responsável pelo ciclo da água utilizado na geração hídrica). Mas a energia vinda do sol também pode ser convertida diretamente em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. A energia solar fotovoltaica ainda é pouco utilizada, mas está se tornando cada vez mais competitiva (PINHO e GALDINO, 2014).

Conforme pontuam Narimatu, Cribari e Guimarães (2018, p.2), “os níveis de produção de energia elétrica dos módulos fotovoltaicos, são irregulares” devido à própria variabilidade da irradiação solar, mas também devido a diversos fatores que causam perda de desempenho como temperatura, sombreamento causado pela poluição atmosférica e impurezas que se depositam sobre os módulos. Por essas razões utilizam-se índices de mérito para avaliar o desempenho de uma usina solar fotovoltaica.

As células fotovoltaicas convertem a energia solar em energia elétrica. As principais células fotovoltaicas conhecidas são as de silício, que têm, individualmente, uma tensão muito baixa, da ordem de 0,5 a 0,8 V. Por isso elas precisam ser conectadas em arranjos. “Um módulo fotovoltaico é composto por células fotovoltaicas conectadas em arranjos para produzir tensões e correntes suficientes para a utilização prática da energia, ao mesmo tempo que promove a proteção das células.” (PINHO e GALDINO, 2014, p.114).

“Sistemas conectados à rede (...) muitas vezes exigem a associação de vários módulos em série” para produzir a tensão necessária (PINHO e GALDINO, 2014, p.115). A associação de vários módulos em série resulta na soma das tensões, ao passo que na associação em paralelo soma-se as correntes.

Um módulo é geralmente identificado por sua potência elétrica de pico W_p , definida nas condições padrões de ensaio (STC): irradiância solar de 1000 W/m^2 sob uma dimensão espectral padrão para AM 1,5 e temperatura de célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (PINHO e GALDINO, 2014). Traçando a curva característica I-V do módulo obtém-se P_{mp} (ponto de máxima potência), I_{mp} (corrente de máxima potência) e V_{mp} (tensão de máxima potência). (PINHO e GALDINO, 2014).

“Para avaliação de desempenho do sistema fotovoltaico, serão utilizados os índices de mérito: YF (*Final Yield*) que é a produtividade (kWh/kWp) e PR (*Performance Ratio*) também chamada de rendimento global (%).” (NARIMATU, CRIBARI e GUIMARÃES; 2018, p.4). O fator *YIELD* ou produtividade indica quantas horas o sistema necessitaria para gerar a mesma energia se operasse o tempo todo na potência máxima. (BICALHO, ARAUJO e CARDOSO; 2018). *Performance Ratio* ou taxa de desempenho é um parâmetro expresso em porcentagem que mostra a relação entre a produtividade e o número de horas de sol pleno (número de horas com radiação constante e igual a 1kW/m^2). (BICALHO, ARAUJO e CARDOSO). Além disso, há o fator de capacidade, também expresso em porcentagem, que é a relação entre a energia gerada e a energia que seria gerada se o sistema operasse em potência nominal o tempo todo. (BICALHO, ARAUJO e CARDOSO).

Em função dos fatores que interferem na geração de energia e da importância dos índices de mérito para avaliar o desempenho das usinas solar fotovoltaica, este trabalho tem como objetivo analisar, através do cálculo dos índices de mérito, o desempenho da usina fotovoltaica do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) - Campus Avançado Ipatinga.

Equacionamento

O fator *Yield* (Y) também chamado de produtividade, pode ser calculado de acordo com a equação (1) (BICALHO, ARAUJO e CARDOSO).

$$Y = \frac{Eg}{P} \quad (1)$$

Sendo Eg a energia gerada por mês em (kWh), e P a potência instalada (kWp).

A equação (2) apresenta a fórmula da potência instalada P :

$$P = n \times P_{mp} \times \eta_{inversor} \quad (2)$$

Sendo n o número de módulos, P_{mp} a potência nas condições de operação, e $\eta_{inversor}$ a eficiência do inversor. A equação (3) abaixo apresenta o cálculo de P_{mp} : (PINHO e GALDINO, 2014).

$$P_{mp}(T) = P_{MP_{STC}} (1 + (\gamma \times \Delta T)) \quad (3)$$

Sendo $P_{MP_{STC}}$ a potência máxima nas condições padrão de teste, γ o coeficiente de variação da potência máxima do módulo com a temperatura, e ΔT a variação da temperatura dos módulos, dada por:

$$\Delta T = T_{mod} - 25^\circ \quad (4)$$

Para um cálculo simplificado da temperatura do módulo, pode ser usado esta equação:

$$T_{mod} = T_{amb} + (Kt \times G) \quad (5)$$

Sendo T_{mod} a temperatura do módulo, T_{amb} a temperatura ambiente G a irradiância média (W/m^2) calculada pelo software RadiaSol®.

Kt é o coeficiente térmico do módulo, normalmente 0,03. Sendo $NOCT$ a temperatura nominal da célula nas condições de operação que é encontrada no *datasheet* dos módulos. (PINHO e GALDINO, 2014).

$$Kt = (NOCT - 20) \div 800 \quad (6)$$

O PR é calculado da seguinte forma: (BICALHO, ARAUJO e CARDOSO)

$$PR = \frac{Y}{HSP} \times 100 \quad (7)$$

Sendo *HSP*, o número de horas de sol pleno calculado através do software RadiaSol® e da irradiância no plano horizontal medida pela estação meteorológica do IFMG Campus Avançado Ipatinga.

Além disso, realizou-se os cálculos da geração teórica (*GT*), determinado na equação (9):

$$GT = P \times HSP \quad (8)$$

E por fim, cálculo do fator de perdas (*FP*), para verificar a porcentagem de perdas entre a geração real e a geração teórica, definido por:

$$FP = \frac{GT - Eg}{GT} \times 100 \quad (9)$$

METODOLOGIA:

Para realização dos cálculos, foi desenvolvido um *software* utilizando a linguagem C, através da IDE Code::Blocks. A interface com o usuário é feita através do terminal. O programa utilizou como parâmetros de entrada:

- Energia Gerada no mês
- Potência Instalada
- Quantidade de módulos
- Potência máxima do modulo no ponto de máxima potência (*Pmp*)
- Área dos módulos (*A*)
- Temperatura nominal da célula nas condições de operação (*NOCT*)
- Coeficiente de temperatura para potência (γ)
- Coeficiente de temperatura para tensão (β)
- Eficiência do Inversor η (*inversor*)

Foram utilizados dados meteorológicos de irradiância e temperatura ambiente medidos pela estação meteorológica *Hobo*® modelo RX3003 (GSM) presente no IFMG Campus Avançado Ipatinga, além da inclinação e orientação dos módulos no software RadiaSol® para cálculo do *HSP* no plano dos módulos. O estudo foi realizado com base em dados reais de geração e posicionamento da usina fotovoltaica montada no IFMG Campus Avançado Ipatinga, a usina possui as seguintes características:

Tabela 1 – Dados dos componentes da Usina Fotovoltaica

Potência instalada	44,88 kWp
Potência nominal dos módulos	340 Wp (Modelo: RSM144-6-340P)
Número de módulos	132 módulos (36 módulos ¹ + 96 módulos ²)
Inversores	2x20 kW (Modelo: Reno-20k com 2 MPPTs)

Fonte: Datasheet Módulo RSM144-6-340P, Catálogo Reno 20k LV, Autoria Própria, 2019, 2021.

De forma automatizada o programa calcula a potência máxima dos módulos ajustada à temperatura, conforme as equações 3 a 5, após faz-se o cálculo da potência instalada da usina, conforme a equação 2. Por fim, calculam-se os índices de desempenho (*Yield* e *Performance Ratio*), geração teórica e o fator de perdas de cada mês.

¹ Módulos posicionados com 237° de azimute.

² Módulos posicionados com 56° de azimute.

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

Utilizando como entrada do *software* os dados relacionados à usina fotovoltaica do IFMG Campus Avançado Ipatinga, no período de dezembro de 2019 até dezembro de 2020, foram obtidos os resultados apresentados na tabela 2. A tabela apresenta também a precipitação média nesses meses, para auxiliar a análise.

Tabela 2 – Resultados do programa e precipitação média dos meses

Mês	Y*(kWh/kWp)	PR*(%)	Geração Teórica(kWh)	Geração Real(kWh)	Fator de Perdas(%)	Precipitação média (mm)
dez/19	136,57	84,24	6776,1	5708	15,76	257
jan/20	107,71	71,64	6290,52	4499,2	28,36	214
fev/20	126,96	89,96	5911,19	5318	10,04	98
mar/20	113,10	85,84	5576,81	4787,4	14,16	149
abr/20	98,72	86,29	4886,58	4199,3	13,71	65
mai/20	98,43	79,20	5334,76	4224,9	20,80	30
jun/20	87,39	76,08	4938,49	3757,1	23,92	15
jul/20	91,23	76,19	5146,42	3921	23,81	12
ago/20	93,46	70,74	5660,12	4004,2	29,26	21
set/20	108,31	72,85	6234,1	4541,6	27,15	54
out/20	93,28	92,54	4397,02	4068,8	7,46	102
nov/20	115,34	85,44	5867,87	5013,3	14,56	213
dez/20	122,20	79,26	6680,72	5294,9	20,74	257

Fonte: Dados da pesquisa.

*Y – Índice Yield

*PR – Performance Ratio

A usina começou a operar no dia 14/11/19. Mesmo com a usina recém montada, o mês de janeiro de 2020 apresentou um alto fator de perdas, o que pode ser explicado por uma queima de fusíveis que ocorreu no dia 28/12/19 e teve como consequência o funcionamento com apenas 50% da capacidade até o dia 16/01/2021.

No mês de março, houve um desarme do disjuntor de um dos inversores, que resultou na perda de 2 dias de geração, o que explica, em parte, um fator de perdas superior ao mês de abril.

Nota-se que, de abril a setembro, os níveis de precipitação foram baixos, abaixo de 65 mm. Visto que a chuva é o principal agente natural de limpeza de sistemas fotovoltaicos, não é surpreendente que nesses meses mais secos o fator de perdas tenha se mantido acima de 20% e chegado a 29,26% em agosto.

Em outubro, nota-se uma redução abrupta das perdas, este podemos atribuir a realização da limpeza realizada no dia 06/10/20. Depois disso, o fator de perdas continuou a aumentar e chegou a 20,74% em dezembro de 2020, apesar de novembro e dezembro serem meses chuvosos, com, respectivamente, 213 mm e 257 mm de precipitação. Este resultado indica que a chuva pode não ser suficiente para a limpeza dessa usina fotovoltaica, sendo necessário a realização de estudo específico para verificar este efeito.

CONCLUSÕES:

Os resultados encontrados são congruentes com o esperado. A geração teórica foi 24,72% maior que a real, o que faz todo sentido já que o modelo utilizado não considera todos os tipos de perda de energia que podem ocorrer em um sistema fotovoltaico. Os índices de desempenho reduziram com o tempo, ao passo que o fator de perda aumentou, o que provavelmente se deve à sujidade dos módulos. Desta maneira, os resultados demonstram que esse tipo de análise de desempenho é muito importante para programar limpezas e manutenções em usinas fotovoltaicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESEB, 2014. Disponível em: <

http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf> Acesso em: 07 de jun. 2021.

NARIMATU, Beatrice; CRIBARI, Felipe; GUIMARÃES, Warley. **Avaliação De Desempenho De Um Sistema Fotovoltaico Comercial De 14,56 Kwp No Município De Serra.** In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2018, Gramado. Disponível em: < <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/85>> Acesso em: 09 de jun. 2021.

BICALHO, Marlon S.; ARAUJO, Tiago P.; CARDOSO, Rafael B. **Análise De Desempenho Do Sistema Fotovoltaico Conectado À Rede Da Universidade Federal De Itajubá – Campus Itabira.** Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 7, n. 1, p. 95-105, 2018. XII Seminário de Meio Ambiente e Energias Renováveis. Disponível em: < <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/57971>> Acesso em: 09 de jun. 2021.

RISEN Solar Technology. **Datasheet: Módulo-RSM144_6_335P_335P.** 2019. Disponível em: < https://solardistri.nl/wp-content/uploads/2018/08/Datasheet-RSM144_6_335P_355P.pdf> Acesso em: 10 de jun. 2021.

RENOVIGI Energia Solar. **Catálogo: Características Reno 20K-LV e 30K-LV.** Ano desconhecido. Disponível em: < <https://renovigi.com.br/produto/inversores/inversor-20-0-kw-reno-20k-lv-trif-220v-60hz>> Acesso em: 10 de jun. 2021.

CLIMATEMPO. **Climatologia e histórico de previsão do tempo em Ipatinga, BR.** Ano desconhecido. Disponível em: < <https://www.climatempo.com.br/climatologia/144/ipatinga-mg>> Acesso em: 10 de jun. 2021.