

Análise da Geração de Energia da Usina Solar Fotovoltaica do Mineirão

Márcio Melquíades Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Departamento de Eletrônica e biomédica – Av. Amazonas, 5253 – Belo Horizonte – MG.

Márcio Eli Souza, Bruno Marciano Lopes

CEMIG Distribuição SA – Av. Barbacena, 1200 – Belo Horizonte – Minas Gerais.

Manuel Losada y Gonzalez, Wallace do Couto

Boaventura, Eduardo Nohme Cardoso

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Antônio Carlos, 6627 – Bloco 1 – Escola de Engenharia - 31.270-010 - Campus Pampulha - Belo Horizonte – Minas Gerais.

Resumo — Este artigo apresenta resultados parciais sobre a avaliação da geração de energia elétrica da usina fotovoltaica do Mineirão através de medições feitas durante um período de 12 meses consecutivos. Neste estudo é feita uma avaliação da geração de energia e de potência gerada diária e mensal. Estes dados são confrontados com as condições climáticas tais como temperatura, insolação diária e radiação solar no período da medição. Devido a disposição não convencional dos painéis solares da usina é possível avaliar os períodos de maior e menor geração de energia e a geração efetiva da usina, permitindo fazer a previsão da geração no diversos meses.

Palavras chaves - Usina solar fotovoltaica, fontes alternativas de energia.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas fotovoltaicos têm experimentado um enorme crescimento ao redor do mundo nos últimos anos. Segundo dados do relatório REN/21-2014, no final de 2013 a capacidade instalada de geração fotovoltaica era de 139 GW no mundo. Em 2004 era de apenas 2,6 GW [1]. Contudo não houve o mesmo avanço no Brasil. Este tipo de geração passou a ter uma maior divulgação a partir da publicação da Resolução Normativa 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em abril de 2012 que estabeleceu os procedimentos gerais para conexão à rede de mini e micro geradores [2]. Desde então houve um crescimento de tipo de usina conectado a rede. Este crescimento deverá ser ainda maior com o aprimoramento desta resolução, ocorrido em novembro de 2015. Esta nova resolução permite a conexão de mini usinas fotovoltaicas de até 5 MW conectadas a rede de distribuição, enquadradas na categoria de mini geração distribuída. Houve também mudanças nas regras que facilitam o processo tais como padronização de solicitações de acesso, redução no prazo para a conexão, além da possibilidade de geração compartilhada através de consórcios ou cooperativa [3].

Neste contexto, registra-se também crescimento da geração solar fotovoltaica, impulsionada pela diminuição dos custos de produção aliada ao avanço tecnológico do setor. Espera, portanto, um aumento significativo na participação deste tipo de geração nos próximos anos.

Diversos estudos têm sido realizados através de medições e simulações com o objetivo de avaliar o desempenho energético

e o impacto desta tecnologia na qualidade de energia. Alguns estudos realizados indicam um comprometimento da qualidade da energia devido à inserção de usinas solares [4]-[6]. Entretanto ainda há pouca experiência deste tipo de fonte de energia no Brasil. Neste artigo é apresentado um estudo realizado através de dados obtidos durante medições contínuas durante um ano na Usina fotovoltaica do Mineirão (USF) em Belo Horizonte.

II. O ESTÁDIO MINEIRÃO E SUA USF

O Estádio do Mineirão está localizado na região da Pampulha em Belo Horizonte, possuindo uma capacidade de público atual de 58.170 pessoas. O Estádio integra-se ao conjunto arquitetônico da Pampulha e, por isso, sua fachada é tombada pelo Conselho do Patrimônio Histórico de Belo Horizonte. O Estádio foi escolhido para ser uma das sedes da copa do Mundo FIFA 2014. Para isto, passou por uma ampla reforma, quando foi construída pela CEMIG, em sua cobertura, a USF.

O estádio tem um formato oval, com uma cobertura em concreto. Esta cobertura é dividida em 88 áreas distintas, denominadas de segmentos, separadas por vigas invertidas. Uma vista área com estas áreas é mostrada na Fig. 1.



Figura 1. Vista aérea da USF Mineirão. Fonte [5].

Nestes segmentos foram instalados painéis fotovoltaicos formando vários *strings*. Devido às restrições de interferência na fachada do estádio, os painéis não puderam ser elevados, o que os tornariam visíveis a um observador externo. Na posição

instalada, os painéis ficaram sujeitos a sombreamentos durante algumas horas do dia. Assim optou-se por utilizar inversores do tipo *string inverters*, ou seja, inversores de pequena potência, normalmente utilizados em instalações comerciais de menor porte. Estes inversores possuem três MPPTs independentes, sendo um para cada arranjo (fase). Desta maneira, o inversor consegue injetar potências diferentes em cada uma das fases, permitindo trabalhar com a máxima potência disponível em cada arranjo. Além das diferenças de potência gerada devido a eventuais sombreamentos, há também duas combinações possíveis de arranjos de painéis nos diversos inversores devido a diferença de área entre as diversas seções da cobertura do estádio. Devido a não elevação dos painéis, há grandes diferença de sombreamento dos painéis no diversos horários e também nas diversas estações do ano.

Contudo, apesar de haver uma associação relativamente elevada de inversores em desequilíbrio, buscou-se um balanceamento de fases, de modo que a USF opere razoavelmente equilibrada.

Existem oito salas de inversores com onze inversores em cada sala. Estas são denominadas de salas técnicas (ST). As ST são conectadas a duas subestações (SE) elevadoras de tensões de 380V para 13,8 kV. Cada SE tem um transformador de 750 kVA e está conectada a quatro ST. Uma SE é denominada de SE Norte e a outra de SE Sul em função da posição geográfica onde estão instalados os painéis solares e as SE [4]-[5].

A. Conexão à Concessionária

O Estádio do Mineirão é alimentado por duas linhas de distribuição subterrâneas (LDS) exclusivas (ramais expressos) em 13,8 kV a partir das SEs Maracanã e Pampulha. A primeira LDS é a responsável pela alimentação do Estádio Mineirão como alimentador principal, enquanto a segunda LDS fica como reserva para o caso de falha da primeira. Há um barramento de comutação dessas duas LDS na SE de conexão do estádio com a rede da concessionária. Esta SE tem duas saídas de energia, sendo uma para o próprio estádio e uma para a USF. Desde a inauguração da usina não houve necessidade de mudança no ramal que atende ao estádio, sendo este ligado sempre na SE Maracanã [6]-[7].

B. Medições no estádio

As medições foram iniciadas no período de testes na Usina, ocorridos no início de 2014. Entretanto neste período houve diversos problemas que impediram medição contínua desde o início tais como a queima de equipamentos de medição e proteção, dificuldades de acesso durante o período da copa do Mundo e desligamento da usina. Somente a partir de setembro de 2014 foi possível realizar medições de forma contínua no ponto de conexão com a rede da concessionária e nas duas SE da usina. Desde então, foram feitas medições pontuais e temporárias em outros pontos da usina tais como na saída de alguns inversores, na conexão das salas técnicas, na SE da concessionária (SE Maracanã). Neste artigo são apresentados os resultados das medições realizadas no ponto de conexão da usina com a rede da concessionária juntos aos medidores de

fronteira, considerando o período de 01 de outubro de 2014 a 30 de setembro de 2015. Sendo assim, a energia medida corresponde a energia gerada no período menos as perdas internas da usina, como perdas nos cabos, perdas nos transformadores e consumo dos equipamentos próprios da usina. Para facilitar a visualização dos gráficos, os dados foram ordenados de janeiro a dezembro.

As medições foram realizadas utilizando analisadores digitais de qualidade de energia Fluke 435 - Série II. Este medidor possui classe de exatidão de 0,1% de tensão e de 0,5% para a corrente. Sua taxa amostral é de 500 amostras por ciclo e conversor analógico digital de 16 bits. Nele foram registradas diversas grandezas, tais como: potência ativa, reativa e aparente, tensão, corrente, fator de potência, Distorção Harmônica Total de tensão (DHT-V), Distorção Harmônica Total de Corrente (DHT-I), módulos e ângulos de harmônicos de tensão e corrente (ímpares até 49º ordem e pares até a 14º ordem). Foi utilizado intervalo de integração de 5 minutos.

C. Dados meteorológicos

Foram utilizados dados históricos da estação Pampulha do Instituto Nacional de Meteorologia. Esta estação fica situada aproximadamente de 2,5 km de distância do estádio [8].

III. RESULTADOS DE MEDIÇÕES

Na Figura 2 são mostrados valores de potência total medida durante o período analisado. Percebe-se que a menor potência média mensal gerada ocorreu no mês de junho. Nota-se também uma interrupção na geração ocorrida durante três dias no mês de novembro devido a um desligamento da usina.

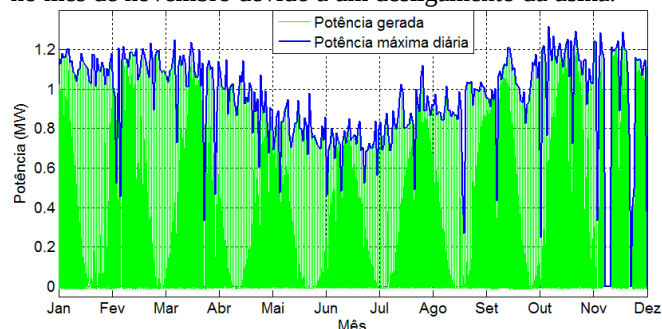


Figura 2. Potência total gerada.

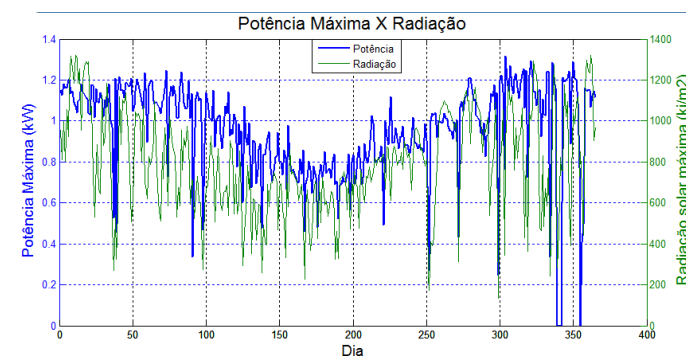


Figura 3. Potência gerada x radiação.

Na Figura 3 é mostrada a curva da potência máxima diária e a curva da radiação solar máxima diária. Percebe-se que a

menor radiação ocorre exatamente no período de menor geração. Contudo não se percebe uma relação direta durante todo este período. Foi feita uma análise utilizando o coeficiente de correção. O módulo do coeficiente de correlação varia entre 0 (baixa correlação) e 1 (forte correlação entre as grandezas). Fazendo a correlação entre a potência gerada e a radiação solar máxima, obtém-se os seguintes valores:

Tabela 1. Correlação entre Radiação e Potência.

Período	Correlação (ρ)
Anual	0,55
Janeiro a junho	0,60
Julho a Dezembro	0,55

Pela Tabela 1 percebe-se que há uma maior correlação entre a radiação máxima e a potência máxima no primeiro semestre.

Na Figura 4 é mostrado o gráfico da energia (kWh) produzida por mês, no período analisado. Os meses com maior geração foram os meses de Janeiro, outubro e novembro, respectivamente.

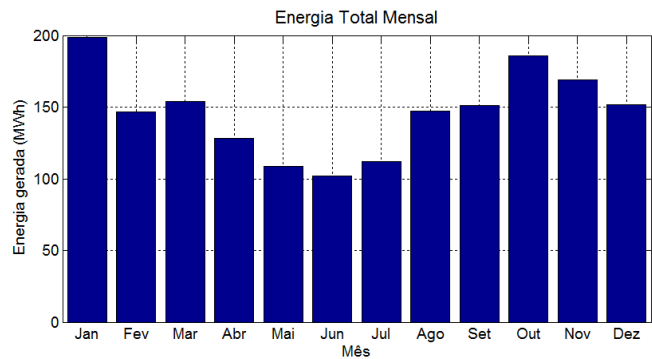


Figura 4 . Energia gerada em 1 ano.

Na Tabela 2 é mostrada a energia total gerada, descontada as perdas e o consumo interno da usina no período noturno. Percebe-se que no segundo semestre a geração foi ligeiramente superior mesmo considerando o número de dias.

Tabela 2. Energia total gerada.

Período	Número de dias.	Média diária (MWh)	Energia Gerada (MWh)
Anual	365	4,80	1754
Janeiro a junho	181	4,63	838
Julho a Dezembro	184	4,98	915

Esta maior geração pode se explicada em parte observando a Figura 5 onde é mostrada a insolação e a precipitação pluviométrica no local. Percebe-se um maior volume de chuva no primeiro semestre.

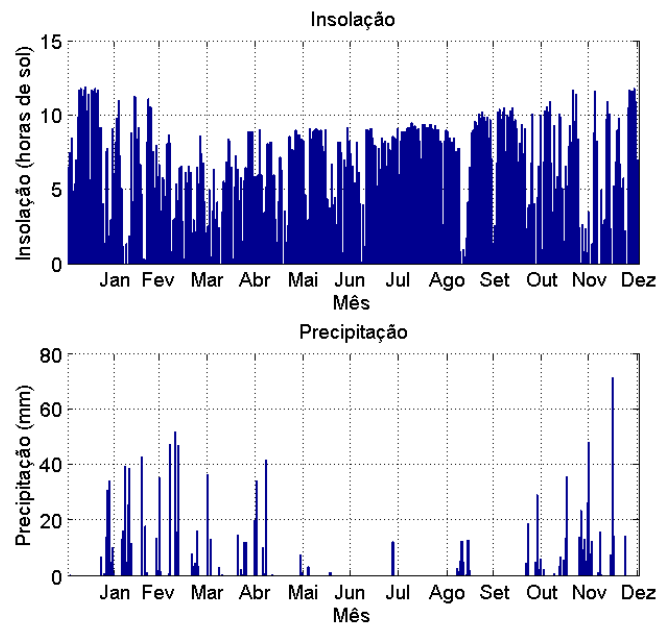


Figura 5. Insolação e precipitação.

Na Figura 6 é mostrada a energia gerada diária e a curva da radiação solar medida no mesmo período.

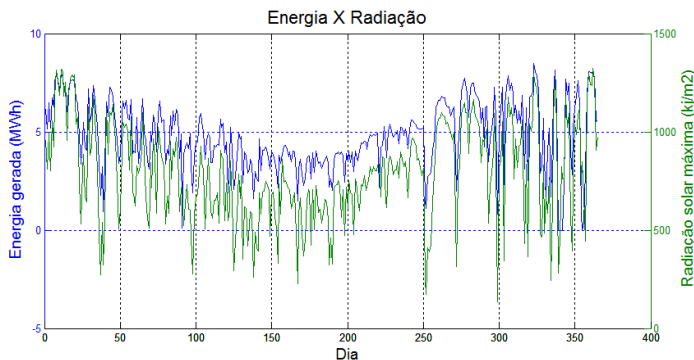


Figura 6 . Energia diária e radiação solar.

Percebe-se uma menor variação da energia total diária gerada no diversos meses do ano. Pela Tabela 3 nota-se uma grande correlação entre a energia gerada e radiação solar, sendo esta mais acentuada no primeiro semestre.

Tabela 3. Correlação entre Radiação e Energia.

Período	Correlação
Anual	0,90
Janeiro a junho	0,95
Julho a Dezembro	0,87

Na Figura 7 é mostrada a curva da energia gerada em função das temperaturas mínimas e máximas diárias. Na Figura 8 é mostrada a geração de energia em função da insolação

diária (horas de sol por dia). Como esperado, percebe-se que há uma forte correlação entre a geração e insolação.

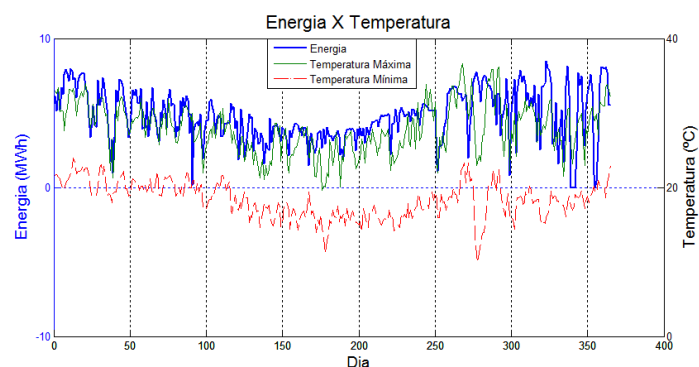


Figura 7 . Energia gerada e temperatura.

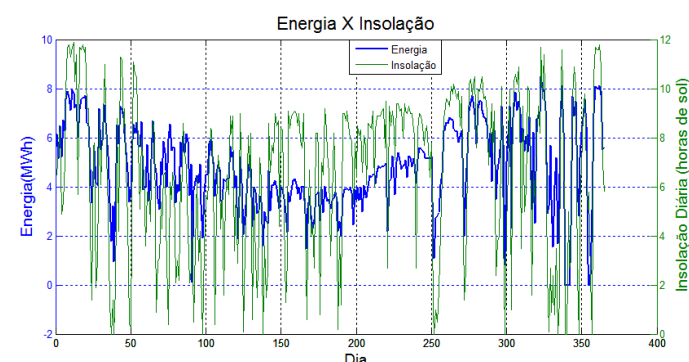


Figura 8 . Energia Gerada e Insolação diária.

Na Tabela 4 é mostrado o coeficiente de correlação da insolação diária com a energia gerada. Neste caso, a correlação foi ligeiramente superior no segundo semestre.

Tabela 4. Correlação entre Insolação e Energia.

Período	Correlação
Anual	0,73
Janeiro a junho	0,70
Julho a Dezembro	0,75

O estudo das correlações e análise dos gráficos permite avaliar se a disposição dos painéis na cobertura, acompanhado a geometria oval do estádio pode afetar a efetiva geração da usina. Nas próximas etapas desta análise será feita uma

comparação entre a geração das duas seções da usina e avaliado também outros indicadores obtidos nas medições.

IV. CONCLUSÕES

Neste artigo foram mostrados os resultados parciais de medições de energia gerada na USF Mineirão. Foram realizadas medições no ponto de conexão da usina com a rede durante o período de um ano. Foram observados os coeficientes de correlação entre a energia gerada os dados meteorológicos. A análise destes fatores permite avaliar se a disposição pouco convencional dos painéis influencia na geração de energia ao longo de um ano. Em alguns casos esperava-se uma maior correlação entre energia gerada e fatores meteorológicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CEMIG, a FAPEMIG e ao CNPQ pelo suporte financeiro aos projetos e às atividades de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] REN21 – 2014. Renewables 2014 Global Status Report. Paris. Disponível on line em <<http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report>>. Acesso em 05/01/2016.
- [2] BRASIL. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. “Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril de 2012”.
- [3] BRASIL. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. “Resolução Normativa Nº 682, de 24 de novembro de 2015”.
- [4] MARTIFER SOLAR, “Usina Solar Fotovoltaica USF-Mineirão,” Belo Horizonte - MG, 2013.
- [5] A. Monteiro Júnior, Modelagem da usina fotovoltaica do Estádio do Mineirão para estudos de propagação harmônica, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.
- [6] CEMIG D, “Informação de Acesso para conexão da usina solar fotovoltaica Mineirão ao sistema elétrico de média tensão da CEMIG D,” Belo Horizonte - MG, 2011.
- [7] CEMIG, “ND-5.31 - Requisitos para a conexão de Acessantes Produtores de Energia Elétrica ao Sistema de Distribuição Cemig – Conexão em Média Tensão,” Belo Horizonte, 2011.
- [8] Instituto Nacional de Meteorologia. Série Histórica. Disponível online em < <http://www.inmet.gov.br/>> Acesso em 05/01/2016.