

Considerações sobre a Qualidade de Energia em um Prédio Universitário com Geração Fotovoltaica

Mateus Dias Braga
Universidade Federal de Itajubá
mhdbmateus@yahoo.com.br

Tiago Elias Castelo de Oliveira
Instituto Técnico Superior (IST) Lisboa, Pt
castelo.tiago@outlook.com

Willer Assis Marcondes
Universidade Federal de Itajubá
willermarcondes@yahoo.com.br

Professor Eur.Ing. Paulo F. Ribeiro, BSEE, MBA, PhD,
PE, CEng, FIEEE, FIET,
IEEE PES Distinguished Lecturer
Universidade Federal de Itajubá

Prof. Benedito Donizeti Bonatto, Ph.D.,
IEEE Senior Member
Universidade Federal de Itajubá
benedito.bonatto@gmail.com

Resumo – Neste artigo são feitas análises dos impactos na Qualidade da Energia Elétrica (QEE), gerados a partir da instalação dos Painéis Fotovoltaicos em um prédio localizado na Universidade Federal de Itajubá. O prédio possui 15 kWp instalados, sendo que através de uma análise técnica e comercial, a capacidade disponível foi estimada em 60 kWp. Primeiramente, foram instalados medidores de QEE no prédio para analisar variações na rede, com o uso do painel fotovoltaico (PV). Os aspectos analisados foram: distorções harmônicas total e individual, perfil de tensão, fator de potência, frequência, demanda, energia e fator de equilíbrio. Os resultados obtidos mostram que os índices estão dentro dos limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST.

Palavras-chave: Qualidade da Energia Elétrica, Pannel Fotovoltaico, Medições, Análise Comparativa.

I – INTRODUÇÃO

Indubitavelmente, a energia solar vem crescendo nos últimos anos. No período de 2010 até 2015, houve um crescimento mundial de 40 GW para 227 GW, dando destaque para países como Alemanha, China, Japão e Estados Unidos [1]. No Brasil, o potencial para a geração solar é alta, uma vez que a irradiância solar é, praticamente, duas vezes maior que a da Alemanha. Além disso, as resoluções das normas 481, 482 e a REN 687 tendem a impulsionar a geração fotovoltaica no Brasil.

Quanto à conexão dos sistemas fotovoltaicos, pode-se dividi-la através da capacidade da planta instalada, sendo classificada como: larga, média e pequena escala [2]. Um exemplo do uso de painéis, em média escala, encontra-se em um prédio da UNIFEI em Itajubá, que possui 15 kWp.

Este artigo tem por objetivo realizar uma análise qualitativa do impacto na Qualidade da Energia Elétrica (QEE), com relação a sobretensões e distorções harmônicas, com o PV conectado à rede.

II – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

II.A – Qualidade da energia elétrica com a implantação de painéis fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos são cada vez mais integrados aos sistemas elétricos, mesmo que estes tragam alguns impactos à rede onde estão conectados. Quando se diz sobre a qualidade da energia elétrica relacionada aos painéis fotovoltaicos integrados, os principais distúrbios causados são: distorção harmônica, mudança no fator de potência e variações de tensão [3].

II.B – Distorção harmônica

Segundo a definição do IEEE, harmônico é uma forma de onda de corrente ou tensão não senoidal que possui frequências que são múltiplas inteiras da frequência para a qual o sistema é projetado para operar [4].

A característica harmônica de um PV varia de acordo com o seu modelo e fabricante. A magnitude e o ângulo das correntes harmônicas dependem de fatores como, por exemplo, a distorção da tensão de alimentação, a potência de saída ou a impedância harmônica da rede. Geralmente, a distorção da tensão de alimentação tem o maior impacto [5].

II.C – Fator de Potência

Os inversores possuem tanto a capacidade de gerar quanto de absorver reativos. O aumento da tensão de alimentação na entrada do inversor faz com que o inversor forneça energia reativa para a rede. Já a diminuição da tensão de alimentação faz com que o inversor absorva energia reativa.

A capacidade de fornecer reativos pode aumentar o nível de tensão da rede em condições de sobrecarga. Contudo, em condições de carga leve, essa característica é indesejável, pois causa sobretensão na mesma [6].

II.D – Variação de Tensão

Em um sistema de geração centralizada, a tensão é mais elevada próxima ao gerador e mais reduzida perto da carga, com a respectiva queda de tensão nas redes de transmissão e distribuição [7]. A presença do painel solar na rede de distribuição acarretará em um acréscimo da variação da magnitude da tensão e, conseqüentemente, da média da tensão, sendo esta variação maior [5]. Desta forma, em alguns casos, os sistemas fotovoltaicos podem atuar como reguladores de tensão para compensar quedas de tensão em situações de carga pesada [8].

III–METODOLOGIA

III.A – O Painel Solar Fotovoltaico

No segundo semestre de 2014, foram instalados painéis solares fotovoltaicos na área superior de um prédio localizado na Universidade Federal de Itajubá. Atualmente, o prédio possui 15 kWp e o sistema instalado é composto por 62 painéis fotovoltaicos, 2 inversores, 1 autotransformador (380/230 – 220/127), estruturas metálicas, sensores e equipamentos de monitoramento.

III.B – Fundamentos de Medição

Foram utilizadas como base para análise da Qualidade da Energia Elétrica as normas regulamentadas de acordo com o Módulo-8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) determinadas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Os principais quesitos para efetuar a análise são [10]:

- Pontos de medição: o medidor deve abranger medições entre todas as fases e neutro ou, entre todas as fases, se o neutro não estiver disponível;
- Como deve ser realizado: o medidor deve ser baseado em amostragem digital com os seguintes requisitos mínimos: taxa de amostragem, de 16 amostras por ciclo, onde a cada ciclo, tem-se um valor eficaz. Também deve-se apresentar tabelas de medição e histograma de tensão na faixa de 0,8 a 1,2 [p.u.];
- O conjunto de 12 (0,2 segundos) a 15 ciclos (0,25 segundos) corresponderá a uma janela. Assim, pode-se obter de 2400 a 3000 janelas, já que o período de integralização deve ser de 10 minutos. Portanto, têm-se 36000 ciclos.
- Duração da medição: a medição deve ocorrer no período de uma semana, ou seja, totalizando 1008 intervalos de 10 minutos. Caso ocorram interrupções, afundamentos ou elevações temporárias de tensão, o intervalo de 10 minutos correspondente deve ser retirado (expurgado) e substituído por igual número de leituras válidas.

Ressalta-se que, no presente trabalho, não houve a necessidade de expurgar valores.

III.C – Medidor e Diagrama Unifilar

Para avaliar os impactos causados na Qualidade da Energia Elétrica (QEE), foram utilizados os medidores *Dranetz-BMI Power Explore PX5*, como segue na Figura 1, e *Dranetz Power Guide 4400*, apresentado na Figura 6 a seguir, que acompanha o *software Dran-View Enterprise 6.1*.

A Figura 1, representa o diagrama unifilar da medição da QEE com o PV conectado ao sistema. Dessa forma, o medidor *Dranetz Power Guide 4400* foi instalado na saída do painel fotovoltaico, após o autotransformador que está conectado à barra de 220 V do prédio, e o outro medidor, *Dranetz-BMI Power Explore PX5*, foi instalado na baixa tensão do transformador de distribuição.

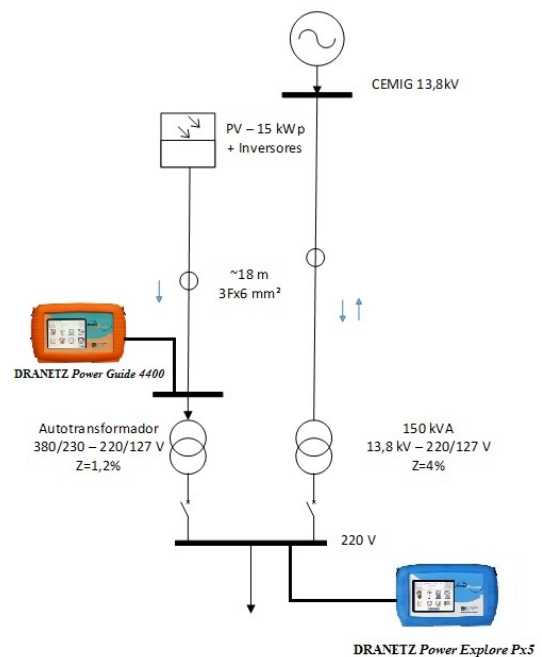


Fig.1 - Diagrama unifilar [11]

III.D – Análise da Qualidade da Energia Elétrica (QEE)

A partir dos dados obtidos, as seguintes grandezas são analisadas:

- Perfil de tensão;
- Distorção harmônica de tensão total e individual;
- Fator de Potência;
- Desequilíbrio de tensão;
- Frequência;
- Demanda;
- Potência reativa;

Para tal análise, foi escolhido um dia de semana, onde há uma maior demanda e um dia no final de semana, cuja demanda é menor. Este critério foi adotado pois as análises serão mais objetivas e claras ao representá-las graficamente. Dessa forma, os dias escolhidos para a representação das grandezas foram os dias 12 de abril (Domingo) e 13 de abril (Segunda-feira).

III.E – Perfil de Tensão

Variações de tensão de curta duração são desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo [10]. As variações de tensão de curta duração são classificadas de acordo com o tempo do evento e a sua amplitude.

III.F – Distorção Harmônica de Tensão Total e Individual

Para os sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorção harmônica devem ser feitas através das tensões fase-neutro para sistemas estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações [9]. Pelo Módulo 8 do PRODIST, tem-se em (1) o cálculo da distorção harmônica total (DTT%):

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (1)$$

onde:

DTT%: Distorção harmônica total de tensão;

V_h : Componente harmônica de ordem h [V];

V_1 : Tensão na frequência fundamental [V].

Da mesma forma, tem-se em (2) o cálculo da distorção harmônica individual (DITH%), baseada no Módulo 8 do PRODIST:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

onde:

DIT_h%: Distorção harmônica individual de tensão;

V_h : Componente harmônica de ordem h [V];

V_1 : Tensão na frequência fundamental [V].

III.G – Fator de Potência

Segundo o PRODIST, o valor do fator de potência deverá ser calculado a partir dos valores registrados das potências ativa e reativa (P, Q) ou das respectivas energias (EA, ER), utilizando-se (3) [10]:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \text{ ou } \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (3)$$

Para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,00 (um) indutivo ou 1,00 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo, de acordo com regulamentação vigente [10].

III.H – Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição. De forma a eliminar possíveis efeitos das componentes de

sequência zero, as medições devem ser realizadas para as tensões fase-fase. O valor de referência nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da BT, deve ser igual ou inferior a 2%. Esse valor serve para referência do planejamento elétrico em termos de QEE [10].

Calcula-se o desequilíbrio de tensão através de (4):

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (4)$$

onde:

FD%: fator de desequilíbrio [%];

β :

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4)^2} \quad (5)$$

V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} : Tensões entre fases [V].

III.I – Frequência

De acordo com o Módulo 8 do PRODIST, o sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz [10].

IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, serão apresentados os resultados e análises das grandezas citadas anteriormente.

IV.A – Perfil de Tensão

A Figura 2 apresenta o comportamento da tensão nas fases A, B e C, durante os dias a serem analisados.

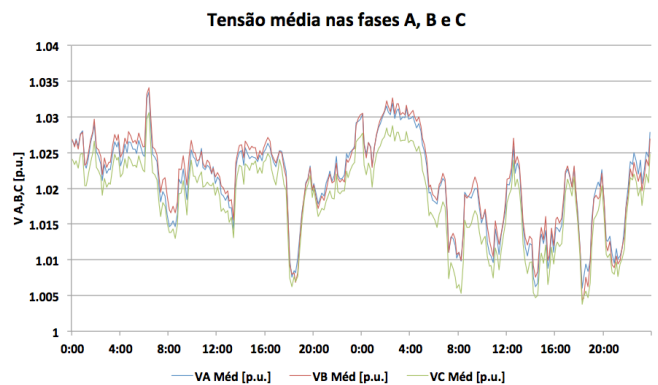
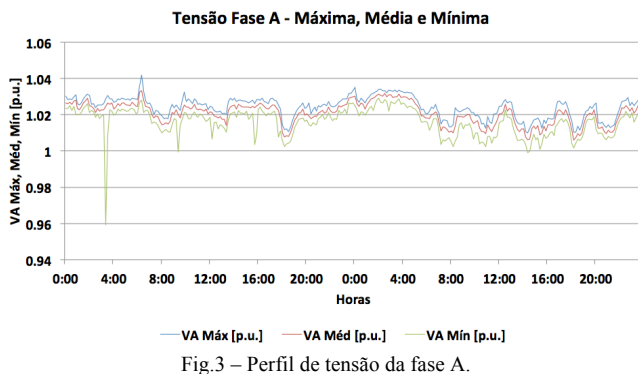


Fig.2 – Perfil de tensão média das três fases.

Pode-se observar que os valores médios de tensão nas três fases estão dentro do limite estabelecido pelo PRODIST. Nota-se também que nenhuma das tensões está sobrecarregada, já que os valores absolutos de tensão são praticamente iguais.

Ressalta-se que os níveis de tensão com o PV conectado ao sistema tendem a aumentar, podendo causar sobretensões na rede.

A Figuras 3 a seguir ilustra o comportamento da tensão máxima, média mínima da fase A.



Nota-se que, em nenhum momento, não ocorreu interrupção, afundamento e elevação de tensão. A Tabela 1 fornece os valores extremos de tensão no período de análise:

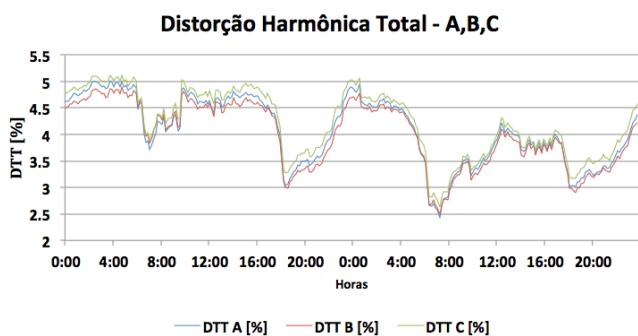
TABELA 1 – VALORES DAS TENSÕES MÁXIMA, MÉDIA E MÍNIMA DA FASE A.

	V. Máxima [p.u.]	V. Média [p.u.]	V. Mínima [p.u.]
Com PV	1,04	1,02	0,96

Desta forma, conclui-se que o valores de tensão máximo e mínimo estão dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST, ou seja, entre 0,9 e 1,1 [p.u.].

IV.B – Distorção harmônica de tensão total (DTT%)

Segundo o PRODIST, o limite máximo para distorção harmônica total é de 10% para baixas tensões. Na Figura 4 a seguir, observa-se que em nenhum momento esse limite é ultrapassado, sendo o valor máximo de aproximadamente 5%.

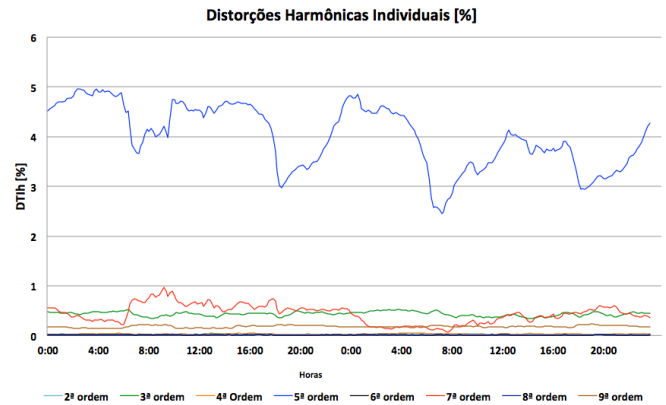


A medição realizada apresentou uma DTT máxima de 5%. Isto ocorre devido à maior distorção de corrente harmônica provocada pelo inversor e cargas conectadas à rede (iluminação, computadores, transformador, etc.) e, conseqüentemente, maior distorção na tensão.

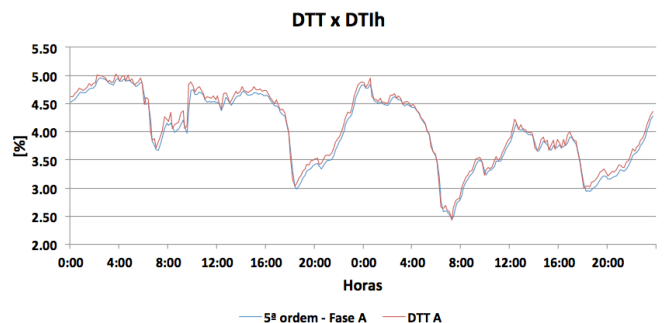
Além disso, nos períodos onde não há geração e menor carga, ou seja, períodos noturnos e finais de semana, a DTT é elevada, pois a corrente fundamental é menor neste caso.

IV.C – Distorção harmônica individual (DIT_h%)

A seguir, a Figura 5 apresenta as distorções harmônicas individuais até a 9ª ordem, para melhor visualização e entendimento do gráfico. Além disso, a DIT_h foi analisada até a 25ª ordem, como recomenda o PRODIST.



A Figura 6, a seguir, faz um comparativo das distorções harmônicas de tensão total e invidual de 5ª ordem.



Nota-se que ambas as distorções harmônicas de tensão apresentam, praticamente, o mesmo comportamento, ou seja, o harmônico de 5ª ordem é predominante perante as demais ordens harmônicas. Isso ocorre pois, no cálculo do DTT, tem-se no numerador todas as distorções harmônicas individuais elevadas ao quadrado. Como esses valores são menores que 1, quando elevados ao quadrado, ficam menores ainda, como mostra a Figura 7.

Além disso, dividindo o harmônico de 5ª ordem pelo harmônico total, temos uma média de 0,984, ou seja, muito próximo de 1, e um desvio padrão de 0,016.

Mais uma vez, o harmônico de 5ª ordem foi predominante, o que condiz com o Figura 5, no qual o mesmo apresentou maior valor durante toda medição.

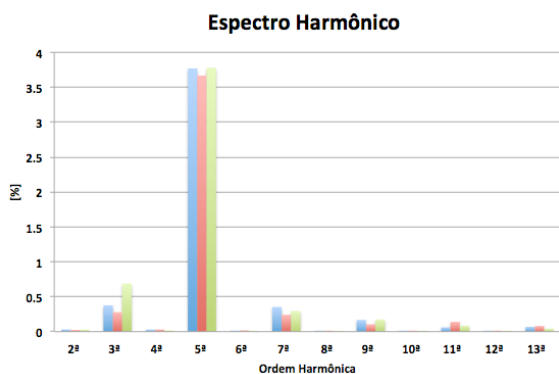


Fig.7 – Espectro Harmônico das fases A, B e C.

Os harmônicos de tensão predominantes nas fases A, B e C são os de: 3ª, 5ª, 7ª, e 9ª ordens, como o esperado. A Tabela 2, a seguir, apresenta os valores máximos das distorções harmônicas individuais e seus limites até a 9ª ordem harmônica.

TABELA 2 – VALORES MÁXIMOS DE DISTORÇÃO INDIVIDUAL E SEUS RESPECTIVOS LIMITES.

Ordem Harmônica	Valor Medido [%]	Limite [%]
3ª	0,92	6,5
5ª	4,95	7,5
7ª	0,98	6,5
9ª	0,23	2

IV.D – Fator de potência (f.p.)

A maioria dos inversores atuais usados para conexão de PVs à rede elétrica opera com fator de potência unitário. Desta forma, o f.p. da rede de distribuição alimentada pelo PV, na qual utiliza o inversor, tenderá a ser mais baixo pois este suprirá apenas potência ativa. O mesmo tende a ser menor nos períodos de pouca carga e, dessa forma, há maior consumo de reativo do transformador de distribuição, utilizado para manter os campos eletromagnéticos, acarretando em sua diminuição. Abaixo, temos a Figura 8, que mostra o comportamento do fator de potência.

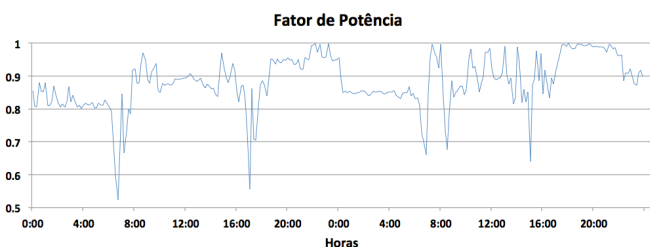


Fig.8 – Medição do fator de potência.

Os resultados do fator de potência apresentados na Figura 8 não foram satisfatórios, uma vez que o mesmo apresentou valores muito baixos e com grandes variações. Assim, nenhuma análise concreta dos resultados pôde ser obtida.

IV.E – Desequilíbrio de tensão

Pode-se observar na Figura 9, o limite estabelecido pelo PRODIST de 2 % não foi ultrapassado em nenhum momento.

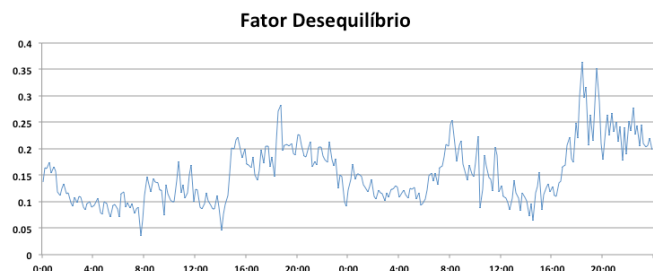


Fig.9 – Fator de desequilíbrio (FD%).

IV.F – Frequência

A frequência manteve-se dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST, ou seja, situados entre 59,9 e 60,1 Hz em regime permanente, conforme mostra a Figura 10, onde o valor máximo foi de 60,06 Hz e o mínimo de 59,94 Hz.

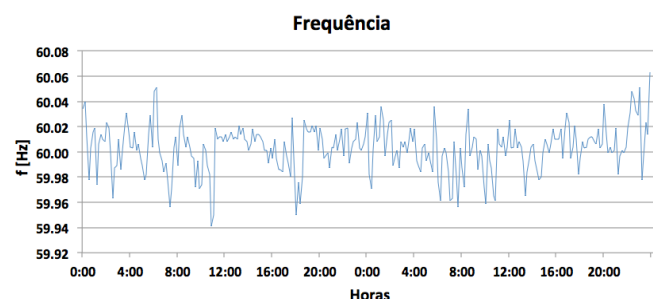


Fig.10 – Frequência.

IV.G – Demanda

No próximo gráfico, Figura 11, tem-se a geração do PV e o consumo e exportação do prédio. A curva vermelha representa o gráfico da geração, com um valor máximo de 12 kWp. As variações ocorrerem devido a períodos de sombreamento no painel, causados pelas nuvens no céu. Nos períodos de pouca demanda, como no Domingo, houve espelhamento entre a curva de geração e a de exportação, ou seja, o PV, praticamente, exportou toda a energia gerada.

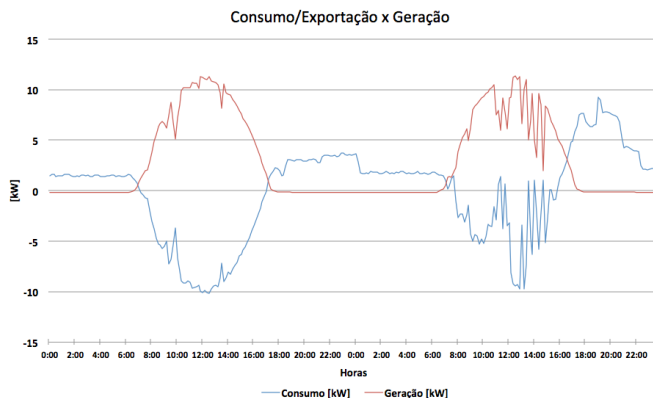


Fig.11 – Comparação entre consumo/exportação e geração

IV.H –Potência Reativa

Pela Figura 12, tem-se o comportamento de demanda reativa. Pode-se observar que durante a madrugada o perfil de reativo se mantém constante, pois a carga é estável. O mesmo é válido no período diurno de domingo, um dia atípico de variações de carga. No entanto, na segunda-feira, onde o sistema sofre variações de carga, na qual computadores, iluminação no interior do prédio são ligados, o perfil de reativo varia é maior.

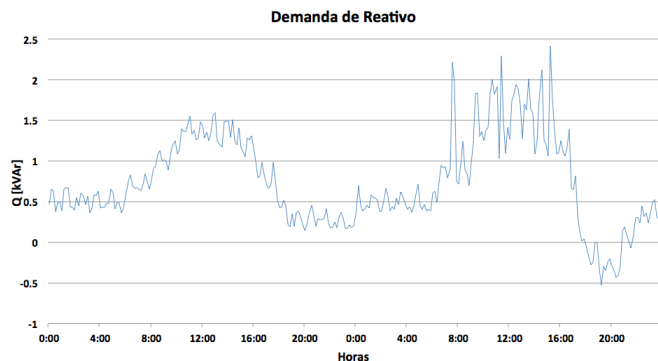


Fig.12 –Demanda reativa.

V– CONCLUSÃO

Este artigo propôs a utilização de métodos de análise através de medições da qualidade de energia elétrica. A análise, em sua essência, tem o intuito de medir e verificar os impactos na rede e na qualidade da energia elétrica pela inserção do painel fotovoltaico.

A medição foi analisada com base no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). As seguintes grandezas foram abordadas: perfil de tensão, distorções harmônicas de tensão total e individual, fator de potência e frequência.

O perfil de tensão apresentou valores satisfatórios, dentro dos limites normativos. Com a inserção do painel fotovoltaico, as distorções harmônicas de tensão total atingiram valores próximos a 5%, ou seja, menos da metade do valor máximo determinado, sendo que o harmônico de 5ª ordem chegou a valores elevados.

Os resultados do fator de potência não foram satisfatórios, uma vez que o mesmo apresentou valores muito baixos e com grandes variações, com valores entre 0,52 e 0,99. Porém, sabe-se que o fator de potência tende a ser menor com a presença do inversor, que pode injetar potência reativa no sistema.

Por fim, a frequência manteve-se dentro dos limites e não sofreu variações bruscas, tanto que sua média foi equivalente a 60 Hz, como esperado. Desta forma, pode-se inferir que a potência do sistema é baixa em comparação com a potência do barramento onde está instalada a geração fotovoltaica.

Além disso, o sistema atuando com o PV apresentou resultados satisfatórios, visto que os índices da qualidade de energia elétrica não violaram as normas vigentes no país.

Recentemente, houve uma expansão dos painéis fotovoltaicos neste prédio, aumentando a geração de 15 para 27 kWp. Assim, novos estudos podem ser realizados para a verificação da qualidade de energia com o acréscimo destes painéis.

VI – AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio parcial do INERGE, CNPq, CAPES, FAPEMIG e UNIFEI.

VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Renewables Global Status Report, 2016, ISBN 978-3-9818107-0-7, www.ren21.net
- [2] PALUDO, J. A. "Avaliação dos Impactos de Elevados Níveis de Penetração da Geração Fotovoltaica no Desempenho de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica em Regime Permanente.", Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, UFSCAR, São Carlos, 2014.
- [3] NASCIMENTO, C. A. D. *Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica*. 2004. Monografia (Pós-Graduação Lato-Sensu em 12 Fontes Alternativas de Energia). Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2004.
- [4] INFELD, D.G., ONIONS, P., SIMMONS, A.D., SMITH, G.A. *Power Quality From Multiple Grid Connected Single-Phase Inverters*. **IEEE Transactions on Power Delivery**, V.19, n4, oct. 2004, p 1983-1989.
- [5] RIBEIRO, P. F; et. AL., Power Quality Aspects of Solar Power, Cigré, Dezembro 2016
- [6] MARIS, T.I., KOURTESI, St. EKONOMOU, L. FOTIS, G.P. *Modeling of a single-phase photovoltaic inverter*. **Solar Energy Materials and Solar cells**. V 91. 2007. Pag1713-1725.
- [7] WOYTE, A. THONG, V.B., BELMANS, R., NIJS, J. *Voltage fluctuations on distribution level introduced by photovoltaic systems*. **IEEE Transactions on Energy conversion**, V 21.n1, mar, 2006. p 202-209.
- [8] SHAYANI, RAFAEL A. *Métodos para Determinação do Limite de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica em Redes Radiais de Distribuição*. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Brasília, 2010.
- [9] SANTOS, I. N.; ČUK, V.; ALMEIDA, P. M.; BOLLEN, M. H. J.; RIBEIRO, P. F. "Considerations on hosting capacity for harmonic distortions on transmission and distribution systems." *Electric Power Systems Research*, v. 119, p. 199–206, 2015.
- [10] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica", 2015.
- [11] T. C. Oliveira; B. D. Bonatto; J. M. Carvalho Filho, P. F. Ribeiro; I. Nunes; "Estudo da capacidade de hospedagem de fontes de geração distribuída no sistema elétrico de um campus universitário". XV CBQEE, 2015. Campina Grande-PB.