

Qualidade de Energia Elétrica de um Sistema Fotovoltaico de 45 kWp conectado à Rede

Quality of Electrical Energy of a 45 kWp Photovoltaic System connected to the Network Grid

¹Ozlean de Lima Dantas, ²Roberto Apolonio,

¹Engenheiro Eletricista e Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental da Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Correa da Costa, 2367, FAET, Cuiabá-MT, (ozlean.dantas@gmail.com)

² Doutor em Engenharia Elétrica, Professor Titular I da Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Correa da Costa, 2367, FAET, Cuiabá-MT, (r_apol@hotmail.com)

RESUMO: Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede vêm cada vez mais ganhando espaço no Brasil. Isto é fruto de uma política energética regulatória iniciada em 2012, expansão mundial dessa tecnologia e o alto potencial de irradiação solar disponível no país. Este trabalho tem por objetivo comparar grandezas elétricas medidas no ponto comum de conexão (PCC) de uma unidade consumidora (UC) com perfil de carga comercial e sua microunidade fotovoltaica (FV) de 45kWp conectada à rede elétrica em relação ao atendimento dos parâmetros da qualidade da energia elétrica (QEE) em regime permanente estabelecidos no Módulo 8 do Procedimento de Distribuição (PRODIST) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Os parâmetros analisados no PCC da instalação foram: perfil de tensão, fator de potência, distorção harmônica total de tensão, fator de desequilíbrio e frequência. Também é apresentado o consumo e geração da unidade consumidora com a usina fotovoltaica para um dia útil e um dia do final de semana. Os resultados obtidos mostram que a UC com a usina FV conectada à rede elétrica em operação não impacta na QEE da rede de distribuição e os parâmetros analisados estão dentro dos limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST da ANEEL, com exceção da tensão que requer ajustes no comutador de carga do transformador da distribuidora que alimenta a instalação.

Palavras-chaves: SFCR. Energia Renovável. Energia Fotovoltaica.

ABSTRACT: Photovoltaic systems connected to the grid are increasingly gaining ground in Brazil. This is due to a regulatory energy policy initiated in 2012, worldwide expansion of this technology and the high potential of solar irradiation available in the country. The objective of this work is to compare electric quantities measured at the common point of connection (PCC) of a consumer unit (UC) with commercial load profile its 45kWp photovoltaic (PV) microvoltage power plant connected to the grid in relation to its compliance with the permanent power quality parameters (QEE) established in permanent regime established in Module 8 of the Distribution Procedure (PRODIST) of the National Electric Energy Agency (ANEEL). The parameters analyzed in the installation PCC were: voltage profile, power factor, total voltage harmonic distortion, unbalance factor and frequency. It was also quantified the consumption and generation of the consumer unit with the photovoltaic plant for a working and weekend day. The obtained results show that the PV with the PV plant connected to the electric grid in operation does not impact on the QEE of the distribution network and the analyzed parameters are within the limits established by ANEEL's PRODIST Module 8 requirements, except for the voltage that requires adjustments in the switch of the distributor that powers the installation.

Keywords: SFCR. Renewable energy. Photovoltaics.

1. INTRODUÇÃO

Na última década, a energia renovável ganhou espaço com aumento da capacidade instalada e na produção de energia. Tanto que, em 2012, esta expansão ficou bem evidente quando a capacidade instalada anual de energia renovável superou as não renováveis e seguiu crescendo (IRENA, 2017). Dentre as energias renováveis em expansão, destaca-se muito a energia fotovoltaica (FV) que tem crescido rapidamente no mercado mundial. Isto fica claro na capacidade líquida global adicionada de energia FV que cresceu 297GW entre 2006 e 2016 (IEA-PVPS, 2017).

Conforme o relatório da SPE (2017), para um horizonte de 5 anos (2017-2021), afirma que em todos os cenários analisados (baixo, médio e alto) ficou indiscutível a expansão mundial da energia FV. Para o Brasil o cenário também é bem positivo, fruto de uma política energética regulatória para acesso da microgeração e minigeração distribuída e o sistema de compensação das energias renováveis iniciada em 2012 com a Resolução Normativa (REN) 482/2012 da ANEEL (2012) e suas atualizações REN 687/2015 da ANEEL (2015) e REN 786/2017 da ANEEL (2017b).

Segundo dados do MME (2016) e da ANEEL (2018a), na última década, a energia FV tem crescido no Brasil, porém está aquém do aproveitamento deste potencial. Conforme os dados da ABSOLAR (2017), estima-se que o Brasil tenha um elevado potencial técnico de energia FV da ordem 28.683GW. Consoante a isto, dados do INPE (2017), destacam que o Brasil possui um alto nível e uma baixa variabilidade de irradiação solar, requisitos importantes na instalação de sistemas FV, em comparação a países que detêm a tecnologia solar bem desenvolvida, como Alemanha, Itália, Espanha, França e Portugal.

Diante deste cenário de estimativa positiva de crescimento da FV na matriz energética brasileira nos próximos anos, torna-se necessário o estudo e domínio dessa tecnologia e seus impactos no sistema elétrico brasileiro.

Além disso, cabe destacar a importância do estudo dos impactos na penetração dessa tecnologia nas várias redes de distribuição do Brasil quanto a Qualidade de Energia Elétrica (QEE), para que não ocorra violação dos limites de QEE estabelecidos pela ANEEL.

Neste sentido, os autores Luiz (2012), Souza *et al.* (2014), Gomes (2015) e Pinto (2016), declaram que a Geração Distribuída, como é o caso da geração FV, representa um grande desafio para a distribuidora, pois altera um sistema elétrico planejado para operar de forma radial no sentido concessionária-carga e passa a trabalhar em ambos os sentidos e, conseqüentemente, há alteração na QEE. Com a mudança no sentido de fluxo de potência a variação de tensão também pode ser vista nos dois lados.

Segundo Hürmeydan *et al.* (2016), um dos impactos que um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) poder ocasionar na rede de distribuição são as alterações no perfil de tensão no ponto comum de conexão, sendo a intensidade dependente das características da instalação e da capacidade da usina fotovoltaica instalada. No entanto, para uma baixa capacidade instalada de um SFCR os impactos na rede da distribuidora no ponto comum de conexão podem ser desprezíveis.

Os trabalhos de Karimi *et al.* (2015), Carvalho (2012) e Pinto (2016), chamam atenção para os impactos da distorção harmônica da forma de onda de corrente e tensão são oriundos do chaveamento dos semicondutores dos inversores do SFCR na conversão de corrente contínua para sincronizar com a fonte principal de corrente alternada. Ainda nos estudos de Pinto (2016) em uma miniusina fotovoltaica, este infere que a Distorção Harmônica de Tensão (DTT) quando se avalia um SFCR é desprezível, porém com um grande número de SFCR pode elevar o DTT da rede da distribuidora. Em virtude desse comportamento, o autor destaca que se deve analisar os dados de cada SFCR e da rede de distribuição como um todo.

Nos estudos realizados por Jimenez *et al.* (2005) destacam o impacto do Fator de Potência (FP) e concluíram que o comportamento do FP é em função do nível de penetração do SFCR. O FP pode ser nulo quando a geração do SFCR é igual ao consumo da carga exigida e torna-se capacitivo para excedentes de geração. Consoante a isto, Motta *et al.* (2017) avaliam nos seus estudos o FP em uma microusina FV de 15kWp, considerando o consumo de potência reativa constante. Assim, concluíram que diminuindo o módulo da diferença entre a potência gerada e consumida, menor será o FP da instalação.

Alguns estudos recentes em relação a qualidade da energia elétrica de mini usinas FV com até 75kWp como os de Pinto (2016), Brito *et al.* (2017), Braga *et al.* (2017), Falcão *et al.* (2017) e Filho e Azevedo (2018) encontraram valores dos parâmetros da qualidade da energia

elétrica abaixo dos limites estabelecidos no Módulo 8 da ANEEL (2018b) que trata dos procedimentos de distribuição para a qualidade da energia elétrica.

Assim, diante da constatação destes autores, é importante que estudos continuem avaliando estes sistemas com intuito de aprofundar o conhecimento sobre o tema. Desta forma, este artigo tem por objetivo comparar grandezas elétricas medidas no ponto comum de conexão (PCC) de uma unidade consumidora (UC) com uma microunidade FV de 45kWp conectada à rede elétrica durante a operação dessa usina em relação ao atendimento dos parâmetros de QEE em regime permanente regulamentados pela ANEEL (2018b). Apresenta-se também as curvas de consumo de energia ativa da UC e da geração de energia ativa da usina FV, a fim de verificar o comportamento do consumo da instalação e da geração da usina.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Distúrbios da Qualidade da Energia Elétrica

2.1.1 Requisitos de QEE da ANEEL

Na verificação dos impactos da penetração (geração) da energia FV, os parâmetros de QEE devem ser atendidos para o bom funcionamento da rede de distribuição. Neste sentido, a ANEEL através do procedimento de rede da ANEEL (2017a), que trata do acesso de microgeração e minigeração distribuída, informa que os parâmetros de QEE a serem adotados são os descritos no Módulo 8 da ANEEL (2018b).

Nesse último procedimento tem-se os limites ou valores de referência de QEE para fins de acesso aos sistemas de distribuição. Os procedimentos de QEE definidos na ANEEL (2018b) devem ser observados por consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição.

As análises dos fenômenos de QEE tratados pela ANEEL (2018b) são os em regime permanente ou transitório. No que se refere ao regime permanente tem-se: a tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de frequência. No regime transitório tem-se as variações de tensão de curta duração. Nesse trabalho, foca-se na análise dos fenômenos de QEE da unidade consumidora com usina FV em regime permanente.

2.1.2 Tensão em regime permanente

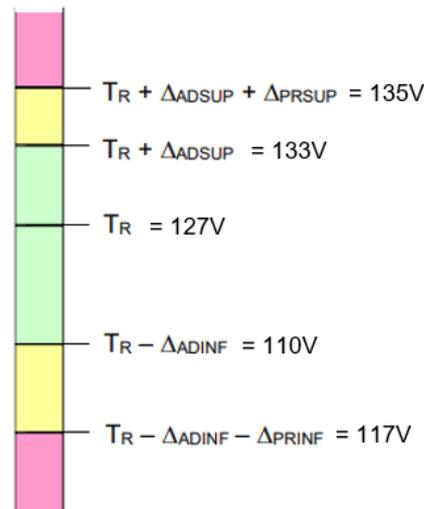
O sistema de distribuição deve atuar de forma preventiva para que a tensão em regime permanente se mantenha dentro dos padrões adequados. Na regulação das tensões de atendimento ao consumidor com tensão inferior a 1kV, a faixa adequada de tensão deve situar entre 92% e 105% da tensão de referência da rede de distribuição. A Tabela 1 e a Figura 1 apresentam as faixas de classificação de tensões de regime permanente para pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1kV (220/127).

Tabela 1 – Ponto de conexão em tensão nominal igual ou inferior 1kV (220/127)

Tensão de Atendimento	Faixa de variação da tensão de leitura (TL) (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$ $(110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$

Fonte: ANEEL (2018b)

Figura 1 - Faixas de tensão em relação a tensão de referência de 127V



Nomenclatura: a) Tensão de Referência (T_R); b) Faixa Adequada de Tensão ($T_R - \Delta_{ADINF}$, $T_R + \Delta_{ADSUP}$); c) Faixas Precárias de Tensão ($T_R + \Delta_{ADSUP}$, $T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ ou $T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRIINF}$, $T_R - \Delta_{ADINF}$); d) Faixas Críticas de Tensão ($>T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ ou $<T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRIINF}$).

Fonte: Adaptado de ANEEL (2018b).

2.1.3 Fator de potência

Este parâmetro é calculado a partir dos valores registrados das potências ativa (P) e reativa (Q), ver equação (1). Logo, o FP no PCC da unidade consumidora deve estar entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo.

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1)$$

2.1.4 Distorção harmônica

São fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. Os limites das distorções harmônicas totais em relação a tensão fundamental para tensões inferiores a 1kV estão detalhados na Tabela 2.

Tabela 2 – Limites das Distorções Harmônicas totais (%) da tensão fundamental

Indicador	Tensão nominal
	$V_n \leq 1,0kV$
DTT95% ^a	10,0%
DTT _P 95% ^b	2,5%
DTT _I 95% ^c	7,5%
DTT ₃ 95% ^d	6,5%

^a Distorção harmônica total de tensão (DTT95%).

^b Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 (DTT_P95%).

^c Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 (DTT_I95%).

^d Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 (DTT₃95%).

Fonte: ANEEL (2018b).

A expressão para o cálculo da grandeza de distorção total de tensão DTT% é expresso na equação (2):

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

em que h se refere a todas as harmônicas de 2 até h_{máx}, onde h_{máx} é dado conforme a classe A ou S (Método de medição Classe A ou S, conforme norma vigente da IEC 61000-4-30).

2.1.5 Desequilíbrio de tensão

É a diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica entre as tensões de fase do mesmo sistema. Normalmente utiliza-se os valores das tensões de linha para o cálculo do fator de desequilíbrio. O limite de desequilíbrio de tensão para tensão nominal inferior a 1,0kV é de até 3,0%. A expressão para o cálculo do desequilíbrio de tensão é dada na equação (3):

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (3)$$

em que FD% é fator de desequilíbrio de tensão em (%); V₋ a magnitude da tensão eficaz de sequência negativa na frequência fundamental; e, V₊ a magnitude da tensão eficaz de sequência positiva na frequência fundamental.

2.1.6 Variação de frequência

A rede de distribuição deve operar com frequência dentro dos limites situados entre 59,9Hz e 60,1Hz. Porém, na ocorrência de distúrbios essa faixa pode ser ampliada para 59,5Hz e 60,5Hz por 30 minutos, até que se recupere o equilíbrio carga-geração. Em situações de corte de geração ou de carga, a frequência pode operar nos seguintes limites da Tabela 3.

Tabela 3 – Limites de operação da frequência

Subfrequência		Sobrefrequência	
Frequência	Tempo (s)	Frequência	Tempo (s)
58,5	10	62	30
57,5	5	63,5	10
56,5	Instantânea	66	Instantânea

Fonte: ANEEL (2018b).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

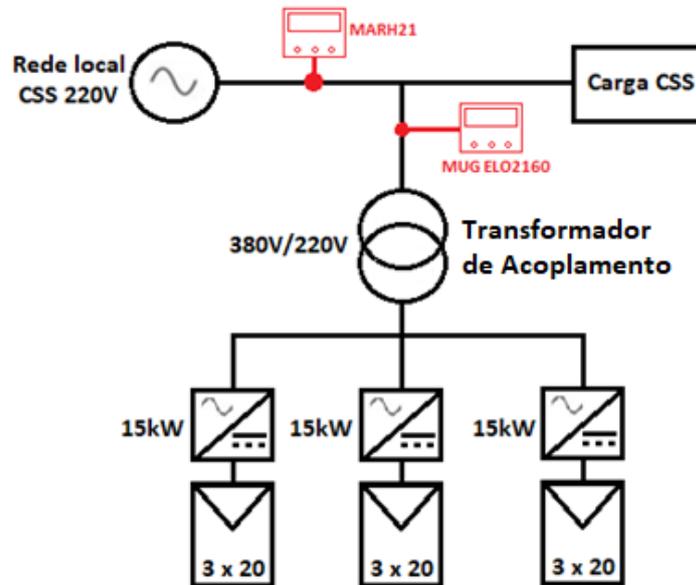
3.1 Usina FV

A Figura 2 ilustra o diagrama unifilar da microusina FV de 45kWp localizada no município de Cuiabá-MT, Brasil. Esta usina FV está instalada em uma unidade consumidora (UC) que apresenta um perfil de carga comercial, com maior consumo de energia elétrica durante os dias úteis.

Os arranjos dos painéis da usina FV estão instalados como cobertura de um estacionamento de veículos leves formando um sistema BIPV (*Building Integrated Photovoltaic System*).

Esta usina contém 3 inversores de 15kW cada, conectados à rede da concessionária local, com saída em corrente alternada na baixa tensão 380V/220V e um total de 180 painéis FV. Há também um transformador de acoplamento de 45kVA, exclusivo para a usina, que fornece energia para a UC e à rede da distribuidora.

Figura 2 – Diagrama unifilar da Usina FV de 45kWp



3.2 Medição

Para a realização deste trabalho foi utilizado um registrador de grandezas elétricas modelo RMS MARH-21 993T. O registrador foi instalado no PCC da UC. O outro medidor de grandezas elétricas modelo MUG ELO2160 foi instalado após o transformador de acoplamento (lado rede) somente para a medição da energia gerada pela usina FV. As medições foram configuradas em intervalos integrados de 10 minutos e no período de uma semana entre os dias 20 e 26 de maio de 2018, conforme os procedimentos da ANEEL (2018b).

Os resultados da medição foram analisados escolhendo um dia útil com maior consumo da UC e um dia do final de semana com menor consumo. Por fim, a partir dos dados obtidos, as seguintes grandezas elétricas foram analisadas: perfil de tensão, frequência, distorção harmônica total de tensão, desequilíbrio, fator de potência e o consumo de energia elétrica. Estes dados da medição foram comparados com base nos limites de QEE estabelecidos pela ANEEL (2018b).

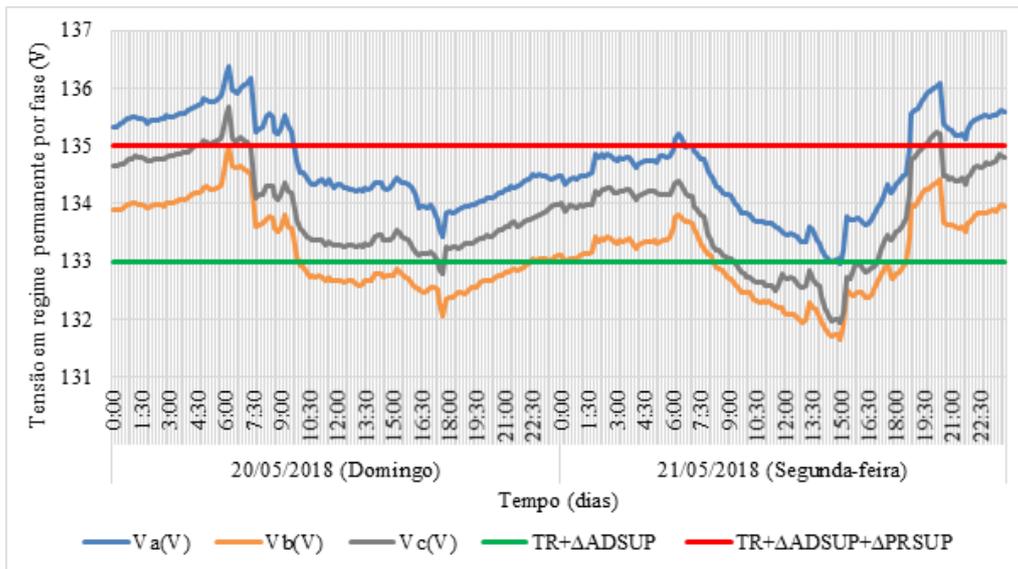
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados das medições que foram realizadas no PCC da UC com uma microusina FV de 45kWp e após o transformador de acoplamento (lado rede) exclusivo da usina FV.

4.1 Perfil de tensão

A Figura 3 ilustra o perfil de tensão por fase em regime permanente da UC, durante um dia útil 21/05/18 (segunda-feira) e um dia do final de semana 20/05/18 (domingo). A tensão de referência (T_R) por fase da UC é 127V medido no PCC. Além disso, há na ilustração as linhas contínuas verde e vermelha representando, respectivamente, o limite da faixa de tensão adequada superior ($\leq 133V$) e o limite da faixa de tensão precária superior ($\leq 135V$), conforme estabelecido pela ANEEL (2018b).

Figura 3 – Perfil de tensão em regime permanente por fase



Limite da faixa adequada de tensão superior ($T_R + \Delta_{ADSUP} = 133V$).

Limite de faixa precária de tensão superior ($T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP} = 135V$).

Observa-se que o perfil de tensão da UC é elevado e os valores por fase estão em boa parte do tempo acima dos limites superiores das faixas adequada ($>133V$) e em alguns momentos as fases A e C estão acima da faixa precária ($>135V$).

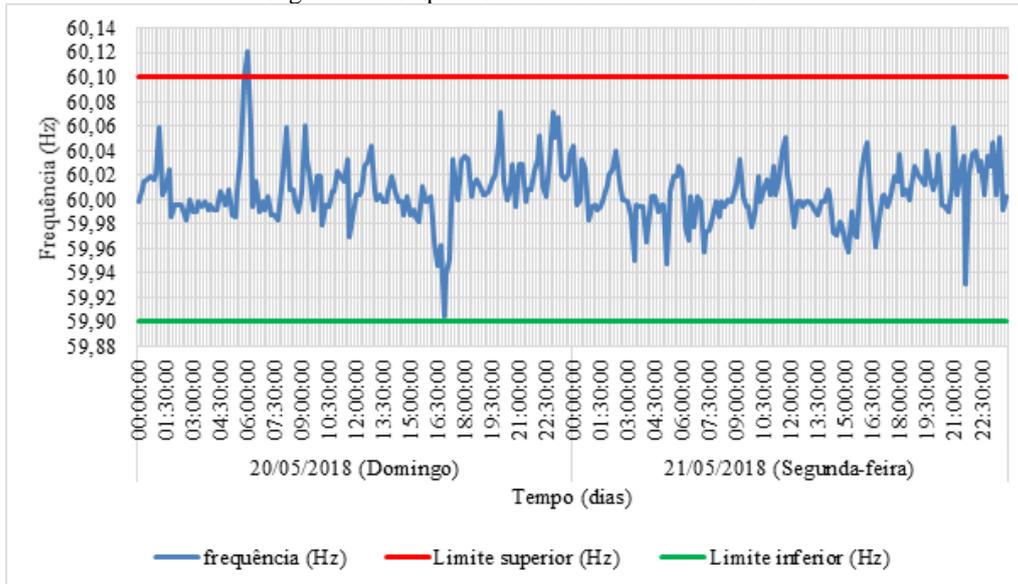
As tensões na UC são mais altas durante a noite e diminuem durante o dia com o aumento do consumo da carga mesmo com a usina FV em operação, mas essa queda tensão é esperada com a entrada de cargas da UC ao longo do dia (iluminação, condicionadores de ar e computadores e etc.). Porém, neste estudo não foi possível desligar a usina FV para verificar o nível de tensão da UC sem a usina FV durante o dia e comparar com a usina FV em operação. No entanto, percebe-se que a baixa capacidade instalada da microusinha FV 45kWp pouco interfere na tensão da rede da distribuidora, conforme verificado por Hürmeydan *et al.* (2016). Comparando os resultados com os de Pinto (2016), que realizou ensaios de uma mini usina FV de 78kWp, constata-se que este também verificou que interferência da tensão é desprezível, com elevação observada de 0,5%, enquanto na potência nominal, a elevação foi de apenas 1,4%.

Diante deste resultado, faz-se necessário efetuar ajustes no comutador de carga do transformador da distribuidora que alimenta a UC da usina FV, a fim de diminuir a tensão para os patamares adequados, conforme estabelecidos na ANEEL (2018b). Outra observação é que em nenhuma das fases foi verificada sobrecarga, pois em termos absolutos os valores de tensão estão próximos.

4.2 Frequência

A Figura 4 ilustra o comportamento da variação da frequência medida no PCC da UC. Observa-se que a frequência se manteve na maior parte do tempo dentro dos limites mínimos e máximos 59,9Hz e 60,1Hz, respectivamente, conforme ANEEL (2018b). As linhas contínuas na cor verde e vermelha representam, respectivamente, o limite inferior e superior definidos pela ANEEL (2018b).

Figura 4 – Frequência da unidade consumidora



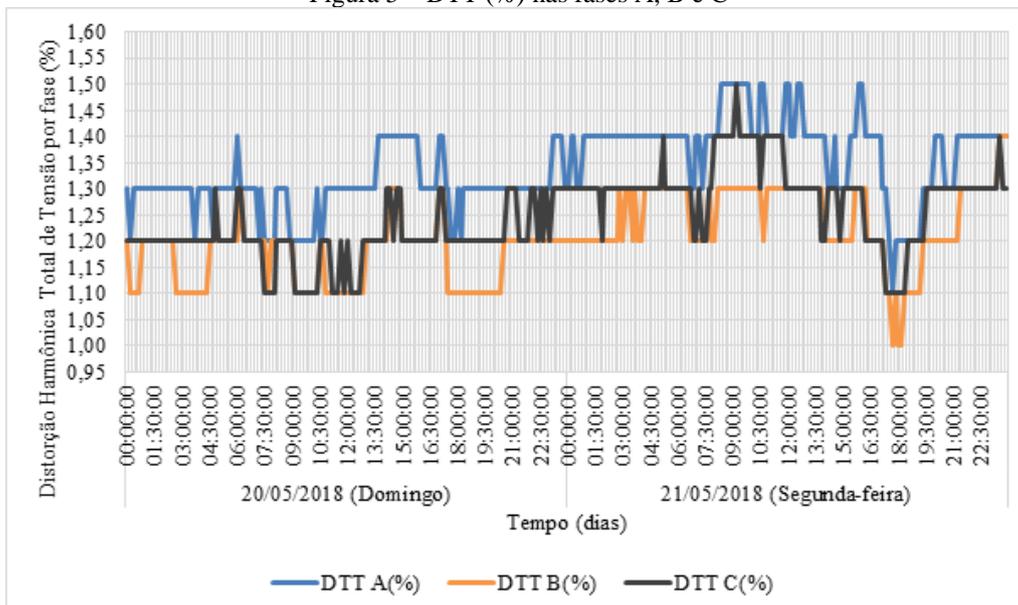
Porém, nota-se que houve registro de violação de frequência acima do limite máximo às 06h do dia 20 de maio de 2018 (Domingo) de 60,12Hz, mas a usina estava fora de operação. A usina FV entrou em operação nesse dia às 07h e saiu de operação às 16h40min. Assim, durante a operação da microusinha FV de 45kW, a frequência medida no PCC da instalação manteve-se dentro dos limites definidos pela ANEEL (2018b).

Vale apresentar que, o atendimento dos limites normativos de frequência durante a operação da usina FV também foi verificado nos estudos de Brito *et al.* (2017) de uma microusinha FV de 18,9kW e nos estudos de Braga *et al* (2017) de uma microusinha FV de 15kWp.

4.3 Distorção harmônica total de tensão

Segundo a ANEEL (2018b), o limite máximo de DTT (%) é de até 10% para tensões inferiores a 1kV. Na Figura 5 verifica-se que não houve violação desse limite em nenhuma das fases medidas no PCC da UC. O valor máximo registrado de DTT (%) foi de 1,5% e houve pouca variação da DTT (%) entre fases.

Figura 5 – DTT (%) nas fases A, B e C

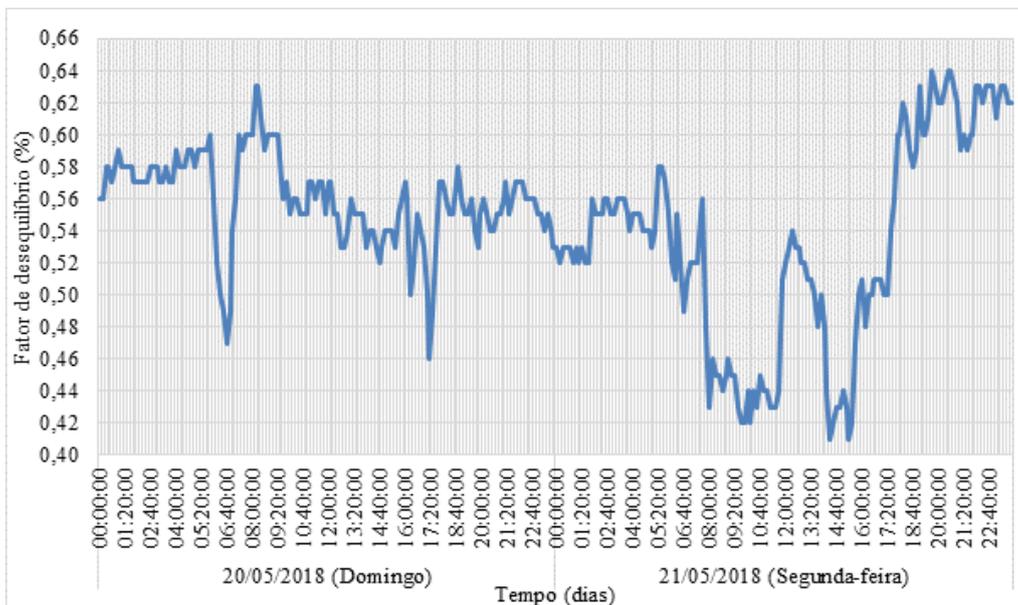


Conforme verificado nos ensaios de uma microusinas FV de Pinto (2016) e de Sa'ed *et al.* (2017), as medições mostraram que a DTT (%) foi considerada desprezível devido à baixa capacidade instalada da usina FV, mas esse valor pode elevar com o aumento do número de usinas FV. Nos estudos de mini usinas FV de Brito *et al.* (2017) com potência nominal de 18,9kW, Braga *et al.* (2017) 15kW e Falcão *et al.* (2017) 22,29kW também resultaram em valores de DTT (%) variando abaixo de 5%.

4.4 Desequilíbrio

De acordo com o procedimento da ANEEL (2018b) para tensões inferiores a 1kV o fator de desequilíbrio (FD) é de até 3,0%. Pela análise da Figura 6, tem-se que o FD% máximo foi de 0,64%, ou seja, bem abaixo do limite estabelecido no procedimento. Os valores encontrados para FD estão de acordo com os observados por Braga *et al.* (2017) que encontraram valores variando abaixo de 0,4% para uma mini usina FV de 15 kWp, bem como os de Filho e Azevedo (2018) que encontraram valores variando abaixo de 1% para uma microusinas FV de 39kW.

Figura 6 – Fator de desequilíbrio (%)

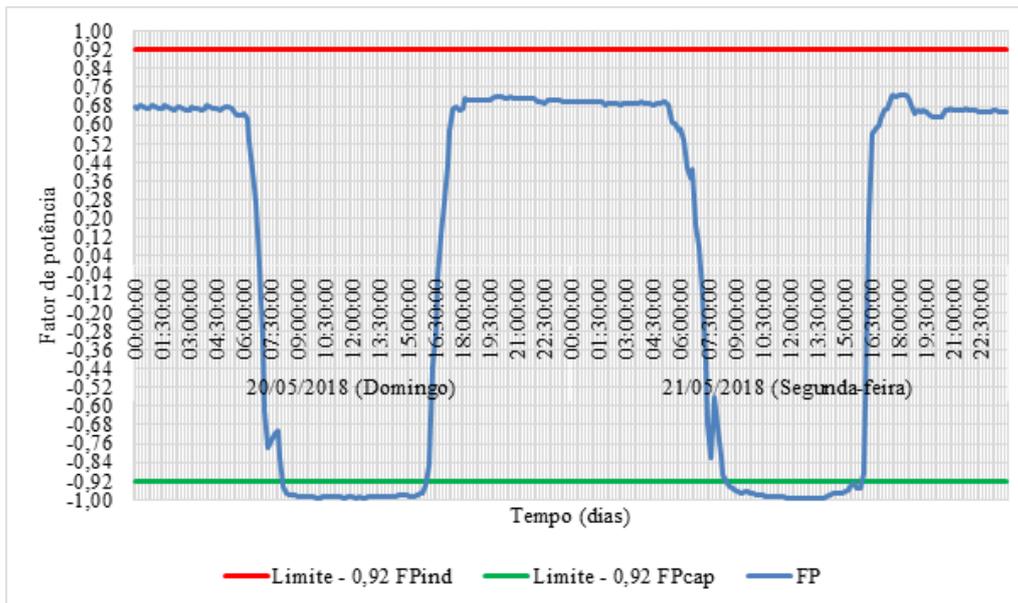


4.5 Fator de potência

O fator de potência (FP) variou ao longo do dia com a usina FV em operação, com valores indutivos da carga a noite e valores capacitivos próximos da unidade com a usina injetando excedentes de potência ativa. A Figura 7 apresenta o perfil do FP da UC com os limites de FP 0,92 indutivo e capacitivo definidos na ANEEL (2018b).

No período noturno o FP é indutivo e tem valores baixos variando entre 0,6 e 0,7. Quando a usina entrou em operação, observa-se mudança de sentido do FP do indutivo para o capacitivo e conforme a usina FV elevava a geração e gerava excedentes de energia ativa, o FP ficou superior -0,92. Nota-se ainda que a microusinas de 45kW objeto de estudo está condizente com os estudos de Motta *et al.* (2017) que analisaram uma microusinas FV de 27kW e Jimenez *et al.* (2005) que analisaram quatro microusinas FV de aproximadamente 18kW cada e verificaram um alto valor de FP superior a 0,9 para uma alta injeção de potência ativa.

Figura 7 – Fator de potência



Além disso, constatou-se que conforme a geração aumentava e começava a suprir a carga, o módulo da diferença da potência gerada e consumida era pequeno e o FP era quase nulo. Este comportamento também foi verificado pelos os autores Motta *et al.* (2017) e Jimenez *et al.* (2005) que observaram que o FP variava em função do nível de penetração (geração) da usina FV. Portanto, o FP pode ser nulo quando a geração da usina FV é igual ao consumo exigido pela carga e torna-se capacitivo para excedentes de geração.

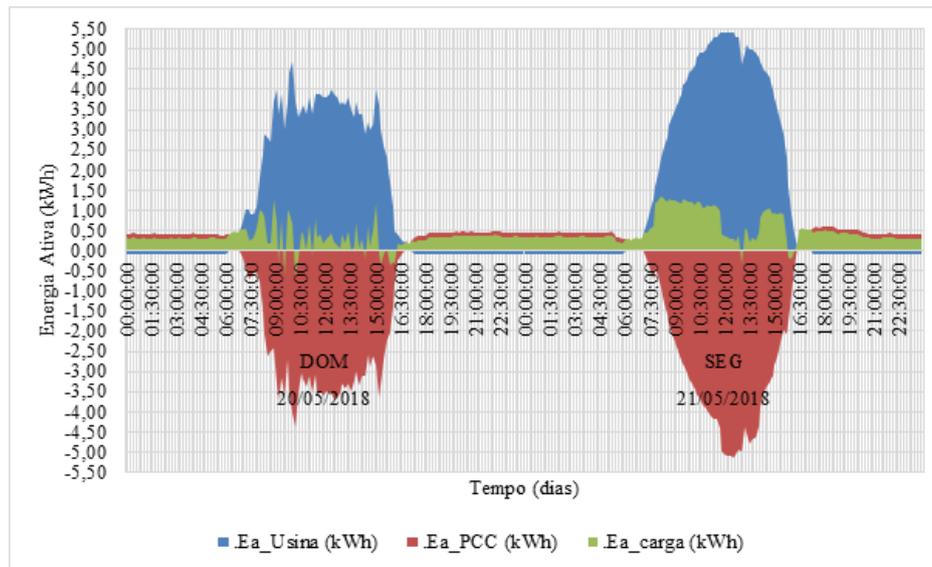
4.6 Consumo

Pela análise da Figura 8, tem-se as curvas de consumo da UC e geração da usina FV, tais como: a energia ativa gerada pela usina FV (Ea_{Usina}), os excedentes de energia ativa medido no PCC (Ea_{PCC}) e a energia ativa consumida pela carga (Ea_{Carga}). Cabe destacar que os excedentes de energia ativa injetados (exportados) na rede de distribuição foram medidos no PCC da UC e corresponde à diferença entre a energia ativa gerada pela usina FV e a consumida pela carga.

Nota-se que no dia 20/05/18 (domingo) houve um menor consumo de energia ativa da UC, devido ao seu perfil de carga comercial, ou seja, com baixo consumo de energia ativa nos finais de semana e alto consumo em dias úteis. Contudo, percebe-se que a curva de energia ativa gerada pela usina FV (Ea_{Usina}) no domingo é menor do que no dia 21/05/18 (segunda-feira), devido as condições meteorológicas naquele dia com céu nublado e menor incidência de irradiação solar sobre os painéis FV.

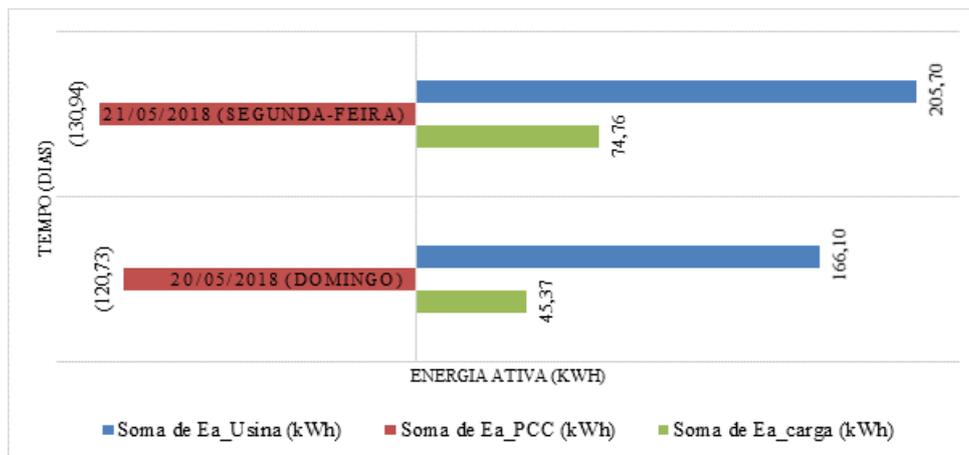
Já na segunda-feira, verifica-se que a curva de energia ativa gerada pela usina FV (Ea_{Usina}) está mais uniforme e semelhante a uma parábola com concavidade para baixo, pois nesse dia as condições meteorológicas estavam mais favoráveis com poucas nuvens.

Figura 8 – Consumo da UC mais a geração da usina (kWh)



Na Figura 9, apresenta-se os valores totalizados de consumo da UC (Ea_Carga) na cor verde, de energia ativa gerada pela usina FV (Ea_Usina) na cor azul e os excedentes de geração verificados no PCC da UC (Ea_PCC) na cor vermelha.

Figura 9 – Valores totalizados do consumo, geração e excedentes expressos em (kWh)



No dia 20/05/18 (domingo), com menor irradiação solar e menor consumo de carga, a usina FV gerou 166,10 kWh e aproximadamente 72% dessa geração foi injetado (exportado) na rede de distribuição e o consumo de carga foi de 45,37 kWh. No dia 21/05/18 (segunda-feira), com maior irradiação solar e consumo de carga, esse valor de injeção na rede atingiu 63% ou 130,94 kWh do total da geração (205,7kWh) mesmo havendo maior consumo de carga (74,76 kWh).

Percebe-se que a carga da UC tem um perfil comercial e sua usina FV atende o seu consumo e gera excedentes. Vale ressaltar que, a geração da usina FV depende diretamente das condições meteorológicas e quanto maior a incidência de irradiação solar sobre os painéis FV maior é a geração da usina FV, é o que se verificou na segunda-feira com maior geração de energia ativa do que no domingo.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho consistiu na medição de grandezas elétricas no PCC e na saída do transformador de acoplamento (lado rede) de uma UC com uma microunidade FV de 45kWp. Os dados da medição foram discutidos e comparados com os parâmetros da qualidade da energia elétrica definidos no Módulo 8 do PRODIST da ANEEL (2018b) e forneceram as seguintes conclusões:

- A tensão no PCC da instalação é elevada e mesmo com a usina operando pouco interferiu na tensão da rede;
 - As medições indicaram a necessidade de ajustes no comutador de carga do transformador da distribuidora que alimenta a unidade consumidora a fim de diminuir a tensão no PCC para os níveis adequados;
 - A frequência se manteve sempre dentro dos limites normativos com a usina em operação;
 - A distorção harmônica total de tensão se manteve todo tempo bem abaixo dos 10%;
- e,
- O fator de potência variou ao longo do dia com a usina em operação e quando a usina gerou potência ativa equivalente a potência consumida pela carga o valor do fator de potência ficou próximo de zero; E, manteve-se com valor capacitivo e muito perto da unidade com excedentes de potência ativa.

Nota-se que a usina gera excedentes de energia e trabalha com o fator de potência bem próximo da unidade, de acordo com a configuração do fabricante dos inversores para o fator de potência igual a 1.

Desta forma, ao analisar a instalação mais a usina FV em operação, verifica-se que obedece aos critérios da qualidade da energia elétrica, com exceção da tensão que está na maior parte do tempo dentro da faixa precária e requer ajustes no comutador de carga do transformador da concessionária que alimenta a unidade consumidora.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Universidade Federal de Mato Grosso e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental.

7. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 482**. 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. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. 17 abr. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 687**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. 24 nov. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 3 – Acesso de Micro e Minigeração Distribuída, Brasília, 2017a.**

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 786**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Diário Oficial da República Federativa do Brasil nº205, de 25 out. 2017b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Banco de Informações de Geração**. Brasília, 2018a. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acessado em: 24 fev. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. **Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, Brasília, 2018b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR - ABSOLAR. **Sessão Especial III: A Expansão do Mercado Solar Fotovoltaico no Brasil**, Salvador-BA, Brasil, 2017. Disponível em: <http://viex-americas.com/2016/wp-content/uploads/2017/12/Rodrigo_Sauaia-III-ABSOLAR.pdf>. Acessado em: 25 fev. 2018.

BRITO, R. R.; FERREIRA, S. C.; SILVA, J. P.; REZENDE, M. A.; MARQUES, R. A.; JESUS, F. D.; FERREIRA, D. D. Qualidade da Energia Elétrica em Sistema de Geração Fotovoltaicos Instalados na UFLA. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE A QUALIDADE DA ENERGIA, 12, 2017, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBQEE, 2017.

BRAGA, M. D.; OLVEIRA, T. E. C.; RIBEIRO, P. F.; MARCONDES, W. A.; BONATTO, B. D. B. Considerações sobre a Qualidade de Energia em um Prédio Universitário com Geração Fotovoltaico. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE A QUALIDADE DA ENERGIA, 12, 2017, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBQEE, 2017.

CARVALHO, K. J. S. **Sistemas Fotovoltaicos Distribuídos e Integrados à Rede Elétrica: Condições de Operação e seus Impactos**. 2012. 113f. Dissertação (Mestrado) - Pós Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ/COPPE), Rio de Janeiro/RJ. 2012.

FALCÃO, M. C.; MACHADO, L. O. M.; PASCHOARELI, D. J.; HARO, M. A.; SILVA, A. A.; SILVA, J. F. R. Avaliação da Distorção Harmônica de Tensão e de Corrente em uma Instalação com Geração Fotovoltaica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE A QUALIDADE DA ENERGIA, 12, 2017, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBQEE, 2017.

FILHO, J. B. M.; AZEVEDO, J. G. Qualidade da Energia na Geração Fotovoltaica através de Inversores de diferentes tipos e fabricantes Conectados à Rede Elétrica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 07, 2018, Gramado. **Anais...** Gramado: ABENS, 2018.

GOMES, J. P. R. **Avaliação dos Impactos da Integração da Usina Fotovoltaica do Mineirão à Rede Elétrica Frente a Afundamentos de Tensão**. 2015. 111f. Dissertação (Mestrado) - Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte/MG, 2015.

HÜRMEYDAN, S.; ROSIN, A.; VINNAL, T. *Effects of PV microgeneration on rural LV network voltage quality - harmonics and unbalance*. **2016 Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ)**, v.1, p. 97-100, 2016. doi: 10.1109/PQ.2016.7724096.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, 2. ed. São José dos Campos, INPE, 2017, ISBN 978-85-17-00089-8.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME – IEA-PVPS. *Snapshot of Global Photovoltaic Markets, Survey report Global Photovoltaic (1992-2016)*, 2017, ISBN 978-3-906042-58-9

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. *Accelerating the global energy transformation. International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi, 2017. ISBN 978-92-95111-06-6 (PDF).

JIMENEZ, H.; CALLEJA, H.; GONZÁLEZ, R.; HUACUZ, J.; LAGUNAS, J.; *The impact of photovoltaic systems on distribution transformer: A case study*. **Energy Conversion and Management**, v.47, n.4, p.311-321, 2005. doi.org/10.1016/j.enconman.2005.04.007

KARIMI, M.; MOKHLIS, H.; NAIDU, K.; UDDIN, S.; BAKAR, A. H.A. *Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network – A review*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.53, p.594-605, 2012. doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.042

LUIZ, C. M. **Avaliação dos Impactos da Geração Distribuída para Proteção do Sistema Elétrico**. 2012. 151f. Dissertação (Mestrado) - Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte/MG,. 2012.

MOTTA, L. J.; JUNG, F. L. L.; RIBEIRO, P. F.; BELCHIOR, F. N. Considerações sobre o fator de potência em prédio universitário com geração fotovoltaica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE A QUALIDADE DA ENERGIA, 12, 2017, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBQEE, 2017.

PINTO, A. F. C. **Avaliação dos impactos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de baixa tensão**. 2016. 108f. Tese (Doutorado) - Pós Graduação em Energia – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo/SP, 2016.

SA'ED, J. A.; QURAAN, M.; SAMARA, Q.; FAVUZZA, S.; ZIZZO, G. *Impact of Integrating Photovoltaic Based DG on Distribution Network Harmonics*. In: 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Milan, 2017, pp. 1-5.

SOLAR POWER EUROPE – SPE. **Global Market Outlook for Solar Power 2017-2021**. Disponível: <<http://www.solarpowereurope.org/reports/global-market-outlook-2017/>>. Acessado em: 08 fev. 2018.

SOUZA, M. E. M; VALE, M. H. M.; CHAGAS, E. H. P. B.; COSTA, S. C. S.; ZILLES, R. Projeto 120 Telhados – Inserção de Micro-Geração Distribuída nas Redes de Baixa Tensão: Implantação de Telhados Solares em Sete Lagoas. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 5, n. 2, 2014, p. 137-146.