

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM UNIDADES PROSSUMIDORAS RESIDENCIAIS

Letícia Mara Beliski – leticiapuhl@hotmail.com

Letícia Toreti Scarabelot – leticia.scarabelot@posgrad.ufsc.br

Giuliano Arns Rampinelli – giuliano.rampinelli@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde

Resumo. A participação da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira, embora pequena, vem crescendo significativamente nos últimos anos. Em 2012, a ANEEL publicou a primeira Resolução Normativa n° 482, que regulamentava o processo de Geração Distribuída (GD) no Brasil, possibilitando a geração de energia elétrica em prossumidores e a contabilização de créditos por parte das concessionárias, hoje, essa resolução já foi atualizada e a RN n° 687/2015 que se encontra vigente. Segundo a Associação Brasileira de Geração Distribuída (ABGD) entre julho e agosto de 2017 existiam 13.321 sistemas de GD instalados no Brasil, sendo que desse montante, 79 % corresponde a instalações no setor residencial. Partindo desse cenário, o presente trabalho analisa, a partir de dados medidos, a qualidade da energia elétrica entregue por dois Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) em unidades prossumidoras residenciais localizadas no Sul de Santa Catarina. Para as medições foi utilizado um analisador de rede que coletou dados de tensão, corrente, potência ativa, potência reativa e potência aparente, componentes harmônicas e fator de potência em um intervalo de 5 minutos em diferentes dias típicos. Utilizando os dados coletados foi possível analisar parâmetros de THD_v, THD_i, IHD_i, FP, potência ativa, reativa e aparente. Considerando que as análises foram realizadas em sistemas FV em operação, sujeitos a diversos intempéries e com flutuação de variáveis, ambos os SFCR fornecem energia elétrica de qualidade dentro do que regem as normas.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos de Geração Distribuída, Inversores, Qualidade de Energia Elétrica.

1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento da energia proveniente do Sol é uma das alternativas viáveis economicamente para diversificar e descarbonizar a matriz elétrica a partir da inserção de uma fonte de energia limpa, renovável e com reduzida emissão de gases de efeito estufa na operação de sistemas fotovoltaicos. O Brasil está localizado em sua maior parte na região intertropical, possuindo grande aproveitamento da energia solar ao longo do ano (PEREIRA et al., 2006).

Em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a primeira Resolução Normativa n° 482, que regulamentava o processo de Geração Distribuída (GD) no Brasil, possibilitando a geração de energia elétrica em prossumidores e a contabilização de créditos de energia elétrica por parte das concessionárias. Prossumidor é um termo novo que vem sendo utilizado para nomear unidades consumidoras que também são geradoras de energia elétrica, ou seja, consomem e produzem energia elétrica. Além disso, em 2015, a resolução foi atualizada para a n° 687 que está em vigor até hoje (ANEEL REN 687, 2015; SOUZA, 2016).

O Balanço Energético Nacional (BEN) de 2017 mostra que quando analisada a matriz elétrica, o setor residencial correspondeu a 21,4% do consumo de energia elétrica, ou seja, 132,9 TWh. Além do mais, a energia hídrica segue como a principal fonte energética brasileira, gerando 421,7 TWh, um equivalente a 68,1% e a energia solar ainda se encontra em fase de desenvolvimento. Este panorama deverá ser alterado nos próximos anos a partir da inserção de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída e usinas fotovoltaicas de geração centralizada. Segundo a Associação Brasileira de Geração Distribuída (ABGD), entre julho e agosto de 2017 existiam 13.321 sistemas GD instalados no Brasil, sendo que o estado de Minas Gerais lidera em quantidade de sistemas e em potência instalada. Além disso, 79% dos sistemas GD correspondem a instalações no setor residencial.

A utilização de GD no Brasil, principalmente de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) tende a aumentar, visto que existem muitos investimentos em pesquisas e tecnologia no setor e em alguns países, o governo utiliza programas para fomentar o uso de energias renováveis. Entretanto, esse aumento significativo de SFCR pode trazer alguns novos desafios para as concessionárias, principalmente na questão da qualidade da energia entregue por esses sistemas e na interface com a rede (PUFAL, 2012). O objetivo principal desse trabalho é medir, monitorar e avaliar alguns dos parâmetros associados à qualidade da energia elétrica injetada à rede por SFCR, nesse caso, distorções harmônicas de tensão e de corrente, questões relacionadas com o Fator de Potência (FP) e Potência Reativa (Q), todos verificados após a saída do inversor. Este trabalho também irá realizar uma comparação entre dois sistemas fotovoltaicos instalados em unidades prossumidoras residenciais, um localizado em Turvo – SC e outro em Meleiro – SC. A influência da interação entre o sistema fotovoltaico e a rede elétrica nos parâmetros de qualidade de energia também será verificada.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados os temas mais relevantes para a compreensão deste trabalho.

2.1 Sistemas fotovoltaicos de geração distribuída

O conceito de GD é usualmente empregado em situações onde a geração de energia elétrica está localizada próximo ao ponto de consumo. Esses sistemas podem ser de grande porte como centrais fotovoltaicas ou de pequeno porte como em edificações urbanas e independem da potência, fonte ou tecnologia (SOUZA, 2014; SOUZA, 2016).

Os sistemas GD não utilizam armazenamento de energia elétrica em fontes como baterias, pois a rede elétrica de distribuição já possui a característica de acumuladora infinita, onde toda a energia produzida é entregue para a rede. Quando a unidade consumidora (UC) responsável pela geração, injeta na rede de distribuição energia elétrica excedente, significa que a geração é superior ao consumo. A energia elétrica excedente é um empréstimo gratuito a distribuidora local, contabilizado em créditos de energia. Quando o contrário ocorre e a UC apresenta consumo de energia maior que a energia elétrica gerada, existe a compensação por meio da distribuidora suprindo a diferença, onde os créditos serão utilizados, ou caso não haja créditos, o consumidor pagará a diferença. A Fig. 1 mostra um esquema do sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2016; NASCIMENTO, 2013; REN 687, 2015; SOUZA, 2016).

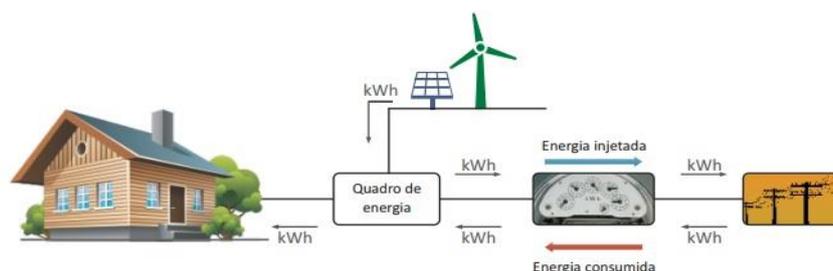


Figura 1 – Sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2016).

Os SFCR são os mais utilizados na GD devido a simplicidade de instalação, a facilidade de expansão, o elevado grau de confiabilidade, mínima necessidade de manutenção, os baixos níveis sonoros de operação e as mínimas emissões de poluentes, se encaixando nas fontes de energia renovável que utiliza o sol como força motriz (GALHARDO; PINHO, 2004).

Os principais componentes dos SFCR são basicamente dois, o gerador fotovoltaico e o inversor c.c./c.a (corrente contínua/corrente alternada) sendo esse último de fundamental importância para os SFCR, pois além de fazer a transformação de c.c. em c.a., é ainda responsável por entregar uma energia de qualidade a rede de distribuição (NASCIMENTO, 2013; RODRÍGUEZ, 2002).

2.2 Qualidade da energia

Há alguns anos atrás, a grande maioria dos equipamentos ligados a rede elétrica consistiam em cargas lineares, ou seja, as ondas de tensão e corrente eram ondas sinusoidais de mesma frequência, podendo apenas estar defasadas entre si. Contudo, os novos equipamentos utilizados nos dias de hoje não se comportam de forma linear, injetando na rede formas de onda diferentes das sinusoidais, gerando harmônicas no sistema. A Fig. 2 (a) apresenta um exemplo de onda senoidal para sistemas com cargas lineares e a (b) traz um exemplo do comportamento não-linear de uma onda senoidal (AFONSO et. al., 2003).

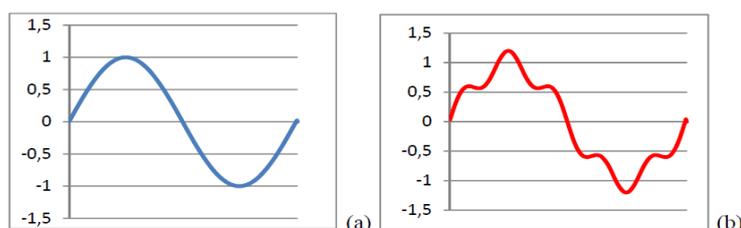


Figura 2 – a) Onda senoidal pura proveniente de cargas lineares; b) Onda senoidal com conteúdo harmônico causado por cargas não-lineares (PUFAL, 2012).

Quando existem problemas com a qualidade da energia entregue alguns distúrbios podem aparecer como interrupção no fornecimento de energia, níveis de tensão fora do padrão, oscilações de tensões e frequência, distorções harmônicas

de corrente e tensão, ruídos, transitórios entre outros problemas de ordem elétrica (AFONSO et. al., 2003; KRENZINGER; RAMPINELLI, 2011; JUNIOR, 2010).

A partir deste cenário, conhecer a qualidade da energia elétrica a ser injetada na rede passa a ser crucial e deve ser incorporada na fase de estudos durante o anteprojeto para garantir que todos os equipamentos irão operar de forma adequada e com o máximo desempenho (JUNIOR; RÜTHER, 2011).

2.3 Harmônicas

Harmônicas são componentes sinusoidais de uma tensão ou corrente alternada com frequência igual ou múltipla inteira da frequência do sistema, no caso brasileiro, 60 Hz, sendo que a ordem da harmônica é contabilizada pelo número de vezes que a frequência da mesma é múltipla da fundamental (INEP, 2011; PUFAL, 2012; KRENZINGER; RAMPINELLI, 2011).

O aparecimento das harmônicas é avaliado pelo THD (Distorção Harmônica Total), que surgiu devido a necessidade de quantificar as harmônicas presentes no sistema. O THD pode ser definido como o quociente entre o valor eficaz do conjunto das harmônicas e o valor eficaz da componente fundamental, entretanto, quando forem ondas sinusoidais puras, a THD é igual a zero (INEP, 2011; NASCIMENTO, 2013; RAMPINELLI et. al., 2008).

Quando analisado o inversor, a soma de todas as componentes individuais de corrente (THD_i) não devem ultrapassar 5 %, e quando analisada a qualidade da energia da rede que atende determinada unidade prosumidora, a THD_v deve ser no máximo de 5 %, fornecendo um parâmetro adequado para garantir a eficiência do inversor (INEP, 2011).

Além disso, a ABNT NBR 16150 de 2013 que especifica os procedimentos de ensaio dos equipamentos utilizados em SFCR, aponta que, para avaliar exclusivamente o comportamento da THD_i produzida pelo inversor, a THD_v da rede de distribuição deve ser menor que 2,5 % garantindo que haja mínima ou nenhuma influência da THD_v sobre a THD_i .

2.4 Fator de potência

O fator de potência (FP) pode ser definido como a diferença de fase entre a onda de tensão e corrente, isso quer dizer que a potência ativa (P) é menor que a potência aparente (S) e a diferença entre elas é chamada de potência reativa (Q). Portanto, o FP pode ser calculado através da razão entre a potência ativa e a aparente (RAMPINELLI et. al., 2008).

A ABNT NBR 16149 (2013), diz que quando for injetada potência ativa acima de 20% da capacidade nominal do inversor, esse deve ser capaz de ajustar o FP dentro de limites preestabelecidos, sendo que, em todos os casos o inversor deverá vir com FP igual a 1 direto de fábrica.

Quando a potência do SFCR for igual ou menor que 3 kW, a faixa de tolerância é entre 0,98 indutivo até 0,98 capacitivo. Se o sistema fotovoltaico apresentar potência entre 3 kW e 6 kW, o inversor deve trabalhar na mesma faixa descrita anteriormente, porém, deve ser possível ajustá-lo, entre 0,95 indutivo e 0,95 capacitivo, de acordo com a Fig. 3 (a), onde P representa a potência instantânea e $P_{nominal}$ a potência nominal ou através do controle de potência reativa (Q) conforme Fig. 3 (b) (ABNT NBR 16149; SOUZA, 2014).

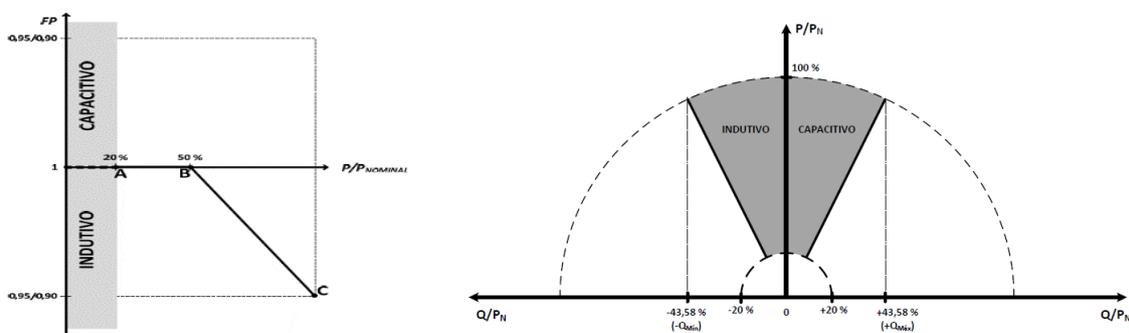


Figura 3 – a) Curva do FP em função da potência ativa de saída do inversor; b) Limites operacionais de injeção/demanda de potência reativa para sistemas com potência acima de 6 kW (SOUZA, 2014).

O baixo FP reflete na redução de potência ativa, aumentando a circulação de potência reativa na rede, causando perdas através dos condutores, interferência nas cargas, diminuição da eficiência, entre outros (SILVA, 2008).

Entretanto, a potência reativa não apresenta só malefícios, ela é, na verdade, muito importante para manter a rede equilibrada. Ou seja, toda vez que um sistema fotovoltaico é conectado à rede elétrica de energia, ele provoca uma pequena elevação da tensão da mesma, portanto, se for levado em consideração os vários sistemas que se encontram nessa situação, a tendência é a tensão da rede extrapolar os limites máximos permitidos (SMA; SMA 2009). Para isso, os inversores possuem um sistema de injeção de energia reativa na rede, composto por capacitores e indutores que tem a função de adequar a tensão, mantendo-a regulada dentro dos padrões (SMA; SMA 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O SFCR de Turvo – SC apresenta potência fotovoltaica (FV) instalada de 1,25 kWp e inversor PHB Solar 1500 – SS. Os módulos são da fabricante Yingli Solar, modelo YL 250 P com 250 Wp cada, totalizando 5 unidades e apenas 1 *string*. O sistema FV está conectado à rede da CERSUL (Cooperativa de Distribuição de Energia), e os dados foram coletados entre os dias 10 e 16/06/2017.

O SFCR de Meleiro – SC é composto por 16 módulos fotovoltaicos dispostos em 2 *strings* da fabricante Canadian Solar, modelo CS6P- 260 com 260 W de potência cada somando 4,16 kWp. O inversor é da fabricante ABB, modelo UNO – 3.6 – TL – OUTD, esse sistema também está conectado à rede da CERSUL. Os dados foram colhidos entre os dias 02 e 06/07/2017.

Para realizar a coleta de dados foi utilizado o analisador de qualidade de energia do fabricante IMS, modelo PowerNet P-600, acoplado na saída do inversor. O analisador foi configurado para registrar os dados de tensão, corrente, potência ativa, potência reativa e potência aparente, componentes harmônicas e FP em um intervalo de 5 minutos.

Os dados coletados pelo analisador são armazenados diretamente no equipamento e posteriormente são transferidos para o computador. Para o tratamento dos dados, primeiramente é utilizado o *software Power Manager Desktop Lite* e em seguida, os dados são convertidos para o formato .CSV.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados das medições de diversos parâmetros de qualidade de energia elétrica realizadas nos sistemas fotovoltaicos de geração distribuída, juntamente com a análise e discussão dos mesmos.

4.1 THD_v E THD_i

A THD_v é uma característica da rede elétrica e que depende do somatório e da influência das cargas elétricas que estão conectadas à rede. Além disso, a distorção harmônica total de corrente da energia elétrica do inversor injetada à rede é dependente da distorção harmônica total de tensão da rede e do carregamento ou potência relativa do inversor. A Fig. 4 mostra a THD_v dos sistemas fotovoltaicos de Turvo – SC e Meleiro – SC durante o período de geração analisado.

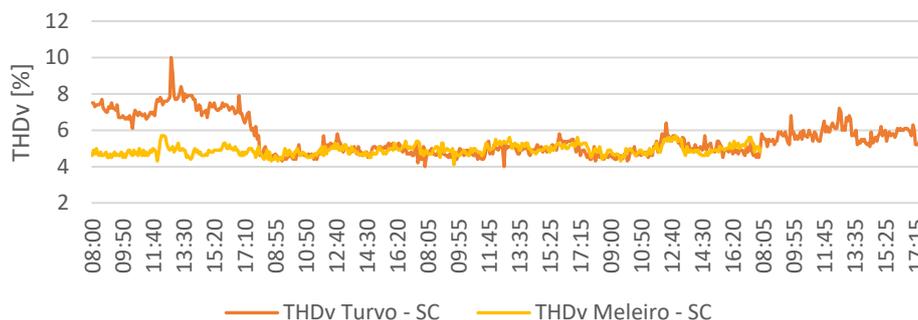


Figura 4 – THD_v em função do tempo dos sistemas FV; a) Turvo – SC; b) Meleiro – SC.

Como pode-se notar, as medidas de THD_v tendem a valores aproximadamente constantes, isso se deve principalmente pelo fato desse parâmetro ser influenciado pela rede de distribuição que também tende a manter os valores de tensão constantes. A relação da THD_i e a proximidade entre a potência ativa instantânea e a potência nominal do inversor é apresentada na Fig. 5.

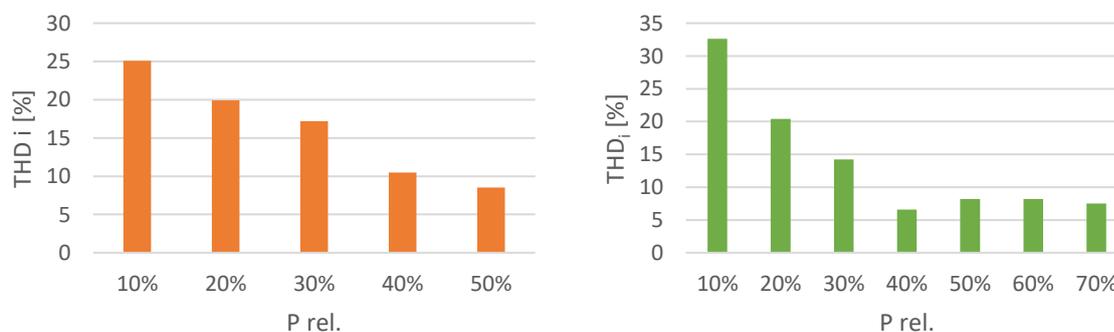


Figura 5 – THD_i em função da potência relativa dos sistemas FV; a) Turvo – SC; b) Meleiro – SC.

As medidas realizadas no sistema FV de Turvo – SC, bem como as realizadas no sistema FV de Meleiro – SC mostram que a THD_i decresce proporcionalmente com o aumento da potência relativa. A THD_i é inversamente proporcional à potência relativa, uma vez que em um sistema fotovoltaico, a corrente é diretamente proporcional à irradiância. A potência do sistema FV aumenta proporcionalmente à corrente e, em potências relativas maiores, percentualmente a distorção harmônica total de corrente tende à valores inferiores à 5 %.

Uma outra forma de mostrar a relação descrita anteriormente é analisar dias específicos para verificar o comportamento da THD_i . As Fig. 6 e 7 apresentam a variação da THD_i em função da potência relativa ao longo do dia para os sistemas fotovoltaicos. Nesta análise são considerados dois dias típicos, um dia predominantemente ensolarado e um dia parcialmente nublado.

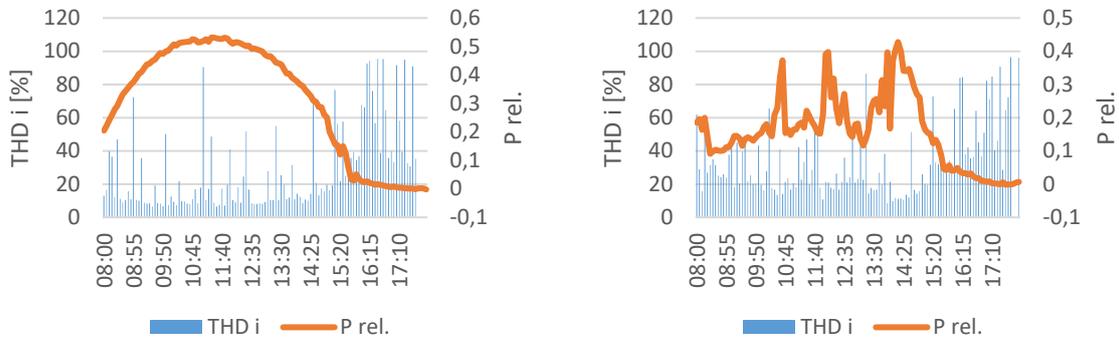


Figura 6 – THD_i em função da potência relativa ao longo dos dias 13/06/2017 (ensolarado) e 14/06/2017 (nublado) para o sistema fotovoltaico de Turvo – SC.

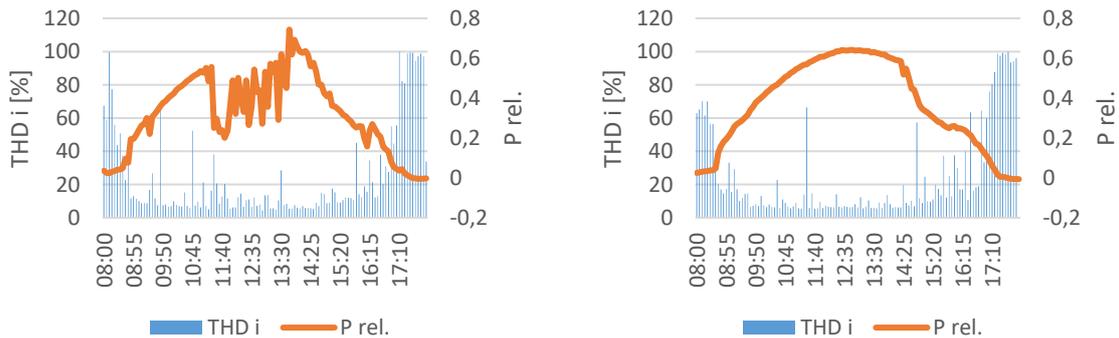


Figura 7 – THD_i em função da potência relativa ao longo dos dias 04/07/2017 (nublado) e 05/07/2017 (ensolarado) para o sistema fotovoltaico de Meleiro – SC.

Para extrapolar os valores da THD_i para 100% de carregamento do inversor, traçou-se linhas de tendência ou curvas de ajuste que são apresentadas na Fig. 8.

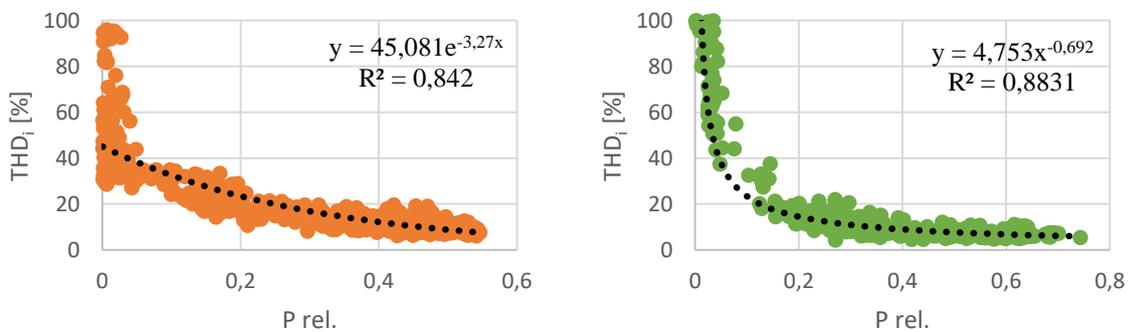


Figura 8 – Linha de tendência da THD_i em função da potência relativa; a) Turvo – SC; b) Meleiro – SC.

Para o sistema FV de Turvo – SC optou-se pela curva de ajuste exponencial de base e, o que resultou em uma THD_i de 1,71 % em potência nominal enquanto para o sistema FV de Meleiro – SC, a curva que obteve o melhor R^2 foi a curva de ajuste exponencial de base x, resultando em 4,75 % de THD_i em potência nominal.

Seguindo as recomendações da ABNT NBR 16149 (2013) e 16150 (2013), a THD_i deve apresentar valores abaixo de 5 % para a medição realizada com 100 % de carregamento do inversor, ou seja, em potência nominal, entretanto a rede de distribuição que o inversor está conectado deve possuir THD_v menor que 2,5 % para que ocorra mínima ou nenhuma interferência desse parâmetro na análise da THD_i , o que não se aplica em ambos os sistemas FV, porém, como a THD_i dessa extrapolação já se encontra abaixo do valor máximo permitido pela norma, caso a THD_v diminua, a THD_i diminui também, visto que são parâmetros dependentes.

Portanto, considerando que essas análises foram realizadas em sistemas FV em operação, sujeitos a diversos intempéries e com flutuação de variáveis, se ambos os SFCR estivessem operando em potência nominal eles estariam fornecendo uma energia elétrica de qualidade dentro do que regem as normas.

4.2 Componentes harmônicas

Conforme a relação entre a potência instantânea e a potência nominal no inversor se altera, a contribuição individual de cada harmônica ou IHD_i (Distorção Harmônica Individual) também se altera. A Fig. 9 apresenta essa análise para as componentes harmônicas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 de cada sistema FV. É relevante mencionar que as medições ocorreram entre os meses de junho e julho, período em que são verificados os menores níveis de irradiância solar no extremo sul de Santa Catarina. Os níveis de carregamento dependem da irradiância solar e também do fator de dimensionamento de inversor.

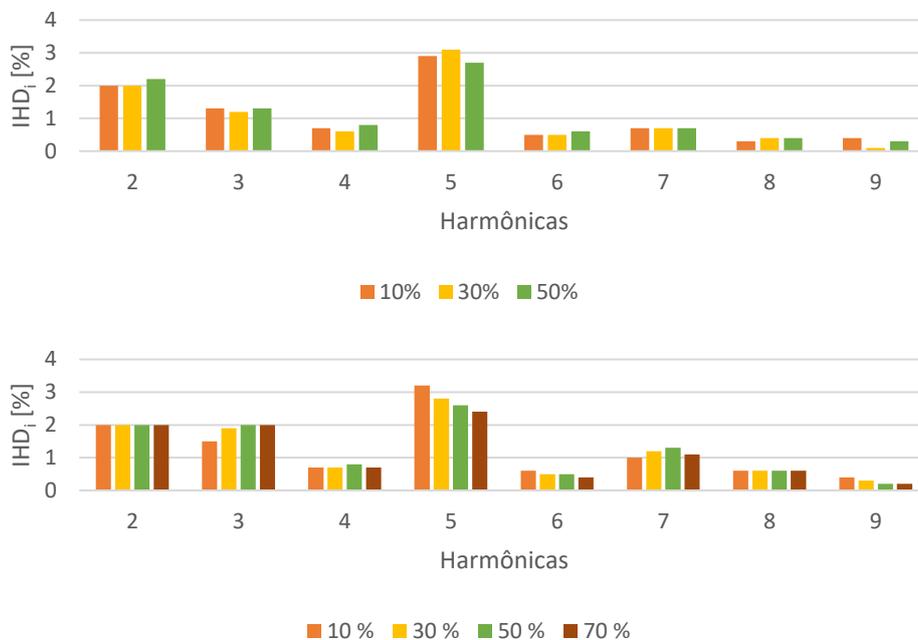


Figura 9 – IHD_i em função do carregamento do inversor; a) Turvo – SC; b) Meleiro – SC.

Independente da relação de carregamento do inversor, para ambos os sistemas fotovoltaicos a quinta harmônica é a que apresenta a maior IHD_i , seguida pela segunda e terceira. Este comportamento está diretamente associado à topologia dos inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Novamente fica visível a relação que a IHD_i , assim como a THD_i , tem com a utilização do inversor, quanto mais próximo ao seu valor nominal de operação, menor será a interferência das componentes harmônicas na energia elétrica injetada à rede pelo inversor.

4.3 Fator de potência

Finalmente, a última variável analisada para verificar a qualidade da energia entregue pelos SFCR é o FP. A Fig. 10 mostra o comportamento do FP para cada sistema fotovoltaico em função da potência relativa ou nível de carregamento do inversor.

O FP também é uma variável que é influenciada pela relação da potência utilizada com a potência nominal do inversor, quanto menor for a potência relativa, menor será o FP, ou seja, a energia ativa é menor, proporcionalmente, à potência relativa. Portanto, quanto mais próximo da potência nominal do inversor o sistema conseguir operar, maior será o FP e maior será a energia ativa proporcional injetada na rede.

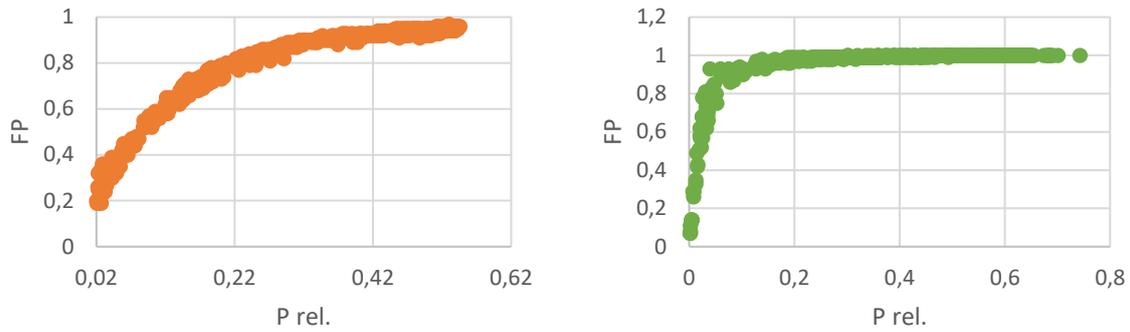


Figura 10 – FP; a) Turvo – SC; b) Meleiro – SC

4.4 Potências ativa, reativa e aparente

O analisador de energia ou de rede também mediu dados de potências ativa, reativa e aparente injetada na rede pelos inversores, possibilitando acompanhar seu comportamento temporal para os períodos considerados. A Fig. 11 mostra esses resultados para o sistema fotovoltaico de Turvo – SC.

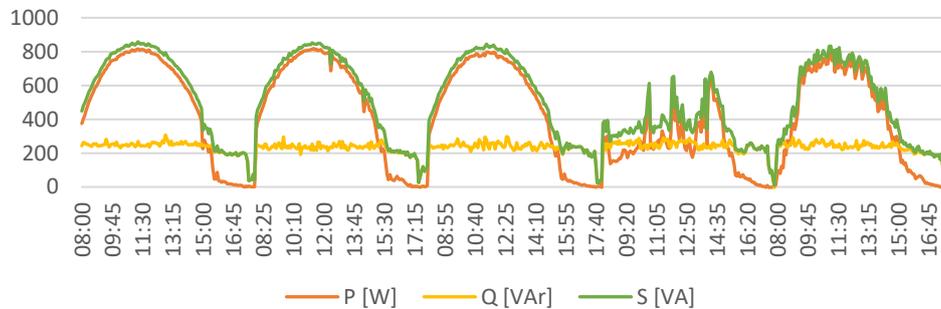


Figura 11 – Potências ativa, reativa e aparente em função do tempo para Turvo – SC.

A Fig. 12 mostra esses resultados para o sistema fotovoltaico de Meleiro – SC.

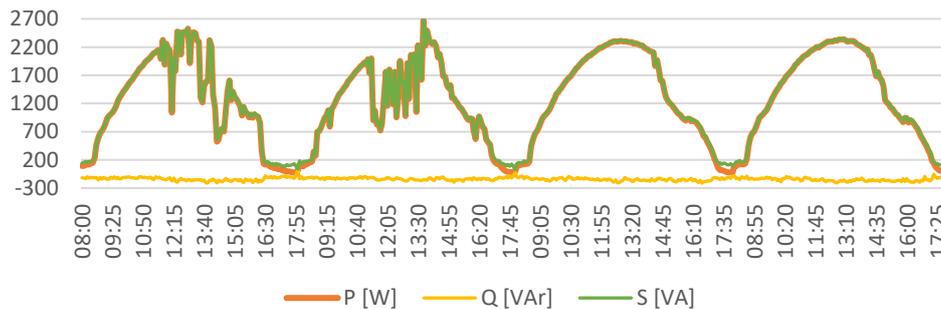


Figura 12 – Potências ativa, reativa e aparente em função do tempo para Meleiro – SC.

Logo de início é possível perceber que ambos os gráficos apresentam curvas que crescem e depois decrescem ao longo do dia, mas também, tem alguns pontos que essa curva apresenta altos e baixos em diversos horários do dia, isso caracteriza um dia de chuva ou muito nublado, onde a irradiação varia muito devido à presença das nuvens.

Para o sistema fotovoltaico de Turvo – SC, o valor da potência reativa se mantém próximo a 250 Var capacitivo, e para o sistema fotovoltaico de Meleiro – SC, o valor é aproximadamente 150 Var indutivo. Partindo dessa análise várias discussões foram levantadas, buscando entender principalmente o comportamento da potência reativa.

Para ambos os casos, a função da potência reativa é a mesma, nivelar a tensão da rede novamente para o padrão normal. A injeção de energia elétrica na rede a partir de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída contribui para aumentar os níveis de tensão da rede, dessa forma, a injeção controlada de potência reativa contribui para reduzir os níveis de tensão da rede e estabilizar a mesma nos valores de referência.

Além disso, a injeção de potência reativa, indutiva ou capacitiva, é controlada a partir do fator de potência do inversor. Esse controle pode ser realizado a partir da parametrização do FP via *software* pelo fabricante do inversor. A

Fig. 3 mostra como o FP do inversor pode se comportar em função do nível de carregamento, e com isso é possível realizar a injeção de potência reativa conforme a necessidade. Acredita-se que exista um banco de capacitores ou indutores no sistema embarcado do inversor responsável pela produção de potência reativa a qualquer hora do dia.

Além disso, a SMA possui uma nota comentando sobre o fornecimento de potência reativa dos seus inversores durante a noite, visto que, quando as primeiras plantas de geração centralizada de energia solar fotovoltaica começaram a operar, as mesmas precisavam de uma planta adicional para realizar a compensação de energia reativa, o que tornava a geração de energia elétrica onerosa. Dessa forma, foi englobado na eletrônica embarca dos inversores, capacitores e/ou indutores utilizados para fornecer essa demanda de reativo, inclusive durante a noite, não sendo mais necessário ter gastos adicionais com as plantas de compensação (SMA, 2013).

Procurando trazer essa informação para os sistemas analisados nesse trabalho, gerou-se as Fig. 13 e Fig. 14, mostrando como se comporta apenas a potência reativa durante todo o período de coleta de dados e o que se pode observar é que, mesmo nas horas que não existe geração de energia pelos sistemas fotovoltaicos, existe fornecimento de potência reativa, onde inclusive o sistema FV de Meleiro – SC torna-se capacitivo.

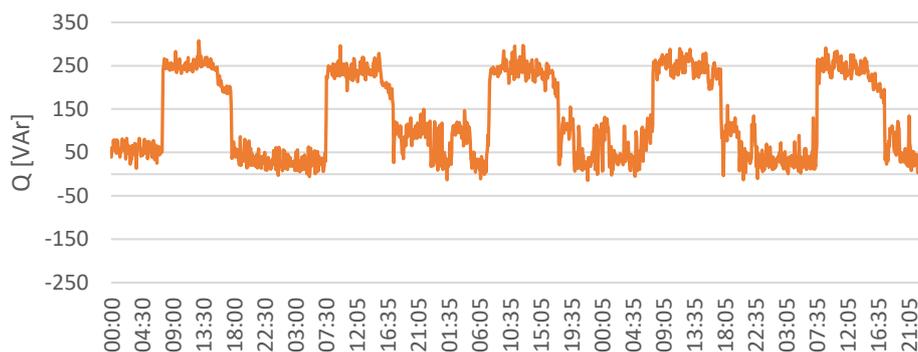


Figura 13 – Potências reativa em função do tempo para Turvo – SC.

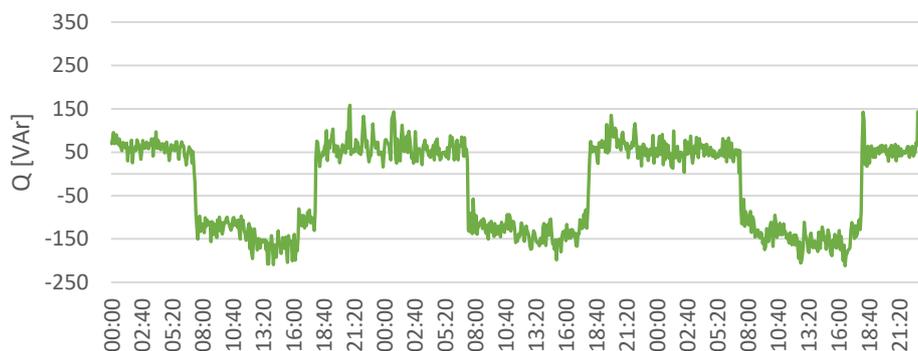


Figura 14 – Potências reativa em função do tempo para Meleiro – SC

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou a qualidade da energia elétrica entregue por sistemas fotovoltaicos conectados à rede em duas unidades prosumidoras residenciais, sendo uma localizada na cidade de Turvo - SC e outra na cidade de Meleiro - SC. Os resultados mostraram uma THD_v que apresenta pouca oscilação, considerada adequada para a inserção de SFCR.

Sobre a THD_i foi possível observar a forte relação dessa variável com a irradiância que incide sobre os módulos fotovoltaicos e, por consequência, com o percentual de carregamento do inversor. O comportamento da THD_i em ambos os sistemas FV obteve crescimento conforme a potência relativa se afasta da potência nominal do inversor. Procurando extrapolar os valores de THD_i para o nível de 100 % de carregamento do inversor, curvas de tendência foram ajustadas às medições, resultando em uma THD_i menor que 5 % nessa condição para os dois SFCR.

Os resultados apresentaram que para ambos os sistemas, independente da potência relativa, a quinta harmônica é a que apresenta índices mais elevados de IHD_i , sendo que esse comportamento está diretamente ligado à topologia do inversor.

O fator de potência pode ser calculado através da razão entre potência aparente e potência ativa, portanto qualquer variação que ocorra em uma dessas variáveis vai influenciar diretamente o FP. Ainda, se ocorrer variação da potência ativa, significa que o sistema FV está recebendo mais ou menos irradiação e portanto a potência relativa também vai ser alterada, dessa forma o FP acompanha essas variações, e na medida que a potência ativa se aproxima da potência nominal

do inversor, mais próximo da unidade o FP tende a permanecer. Esse comportamento é comum para todas as topologias de inversores devido a essa relação de potências.

Dentre todas as análises feitas, a variável que se destacou foi a potência reativa. Cada inversor tem a sua particularidade, e, pelo fato de eles serem parametrizados nas fábricas, somente com medições ou acesso ao *software* que realiza o controle do equipamento é possível saber ou modificar a natureza da potência reativa que é injetada na rede, entretanto, todos eles devem seguir e respeitar as normas técnicas para que possam ser utilizados em SFSCR. Além disso, existe a necessidade de injeção de potência reativa na rede para controlar os níveis de tensão que acabam variando devido a presença do sistema FV, e para isso, acredita-se que os inversores possuam bancos de capacitores e/ou indutores que fornecem a quantidade de potência reativa que a rede de distribuição demanda, inclusive durante a noite, quando o sistema FV não está gerando energia elétrica. Considerando que essas análises foram realizadas em sistemas FV em operação, sujeitos a diversos intempéries e com flutuação de variáveis, ambos os SFSCR fornecem energia elétrica de qualidade dentro do que regem as normas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

REFERÊNCIAS

- ABGD. Associação Brasileira de Geração Distribuída. Disponível em: <<https://www.geracaodistribuida.org/copia-mapa-do-mercado2>> Acessado em: Agosto de 2017.
- AFONSO et. al. Qualidade de energia eléctrica. In: III Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia – Engenharia e Inovação para o Desenvolvimento. 219-231 p. Maputo, Moçambique, 2003.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa 482 de 17 de Abril de 2012. 2012.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa 687 de 24 de Novembro de 2015. 2015.
- ANEEL - CADERNOS TEMÁTICOS. Micro e Minigeração Distribuída – Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161>> Acessado em: Agosto de 2017.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16149: Sistemas Fotovoltaicos – Características da Interface de Conexão com a Rede Elétrica de Distribuição. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16150: Sistemas Fotovoltaicos – Características da Interface de Conexão com a Rede Elétrica de Distribuição – Procedimento de Ensaio de Conformidade. Rio de Janeiro, 2013.
- BEN. Balanço Energético Nacional. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2017_Web.pdf> Acessado em: Agosto de 2017.
- GALHARDO M. A. B, PINHO J. T. Avaliação da qualidade da energia fornecida por sistemas renováveis isolados de pequeno porte. In: V Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída – AGRENER GD 2004.
- INEP. Instituto de Eletrônica de Potência. Harmônicas em sistemas industriais de baixa tensão. Departamento de Engenharia Elétrica – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- JUNIOR J. U. Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análises dos parâmetros que possam afetar a conectividade. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- JUNIOR J. U., RÜTHER R. Qualidade da energia elétrica e o funcionamento de inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Revista Brasileira de Energia Solar. Ano 2. II v. Número 1. 17-28 p. Julho de 2011.
- KREZZINGER A., RAMPINELLI G. A. Estudo da qualidade da energia elétrica injetada à rede por inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos. Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente. 15 v. Argentina, 2011.
- NASCIMENTO M. A. P. Avaliação de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico numa rede elétrica. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Sistemas de potência e Automação, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.
- PEREIRA E. B. et. al. Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos, 2006.
- PUFAL R. A. Modelagem de cargas não lineares e rede de energia elétrica para simulação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- RAMPINELLI G. A. et. al. Ensaio de inversores para conexão à rede: fator de potência e distorção harmônica. In: II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES. Florianópolis, Novembro de 2008.
- RODRÍGUEZ C. R. C. Mecanismos regulatórios, tarifários e econômicos na geração distribuída: o caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

- SMA. Q at night. Disponível em: <http://www.sma-america.com/fileadmin/content/www.sma-america.com/Partners/Images/Knowledgebase/Q_at_night/Q%40NIGHTWP-UUS134511P.pdf> Acessado em: Agosto de 2017.
- SMA. Why reactive power is importante. 2009. Disponível em: <<http://www.sma.de/en/partners/knowledgebase/sma-shifts-the-phase.html>> Acessado em: Agosto de 2017.
- SMA. Profitable night shift. 2013. Disponível em: <<https://www.sma.de/en/partners/knowledgebase/profitable-night-shift-for-inverters.html>> Acessado em: Setembro de 2017.
- SOUZA M. E. M. Inserção de microgeração distribuída nas redes de baixa tensão: implantação de telhados solares – estudo de caso real. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- SOUZA A. C. Análise dos impactos da geração distribuída por fonte solar fotovoltaica na qualidade da energia elétrica. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

ANALYSIS OF THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN RESIDENTIAL PROSUMER UNITS

Abstract. *The participation of photovoltaic solar energy in Brazilian energy matrix has been growing significantly in recent years, although it is still small. In 2012, ANEEL published the first Normative Resolution No. 482, which regulated the process of distributed generation in Brazil, making possible the generation of electric energy in prosumers and the accounting of credits by the concessionaires. Actually, this resolution already was updated by NR n° 687/2015. According to the Brazilian Association of Distributed Generation (ABGD) between July and August 2017 there were 13,321 distributed generation systems installed in Brazil, of which 79% corresponds to installations in the residential sector. From this scenario, the present paper analyzes the quality of the electrical energy delivered by two grid-connected photovoltaic systems from measured data of residential prosumers in South of Santa Catarina. For the measurements, a power analyzer was used to collect data of voltage, current, active power, reactive power and apparent power, harmonic components and power factor on different typical days. Using the collected data it was possible to analyze the parameters of THD_v, THD_i, IHD_i, PF, active, reactive and apparent power. Considering that the analyzes were performed in photovoltaic systems in operation, subject to various weather conditions and variable fluctuations, both grid-connected photovoltaic systems provide quality electrical energy within the standards.*

Key words: *Grid-Connected Photovoltaic Systems, Inverter, Quality of Electric Energy.*