

ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA DE SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

Leo Victor Maurer Schleder¹, Artur Cardoso Severo²

Universidade La Salle

Canoas RS, Brasil

leo.schleder0697@unilasalle.edu.br, artur.severo@unilasalle.edu.br

Abstract— Este trabalho propõe uma análise da qualidade de energia de um sistema de microgeração através de simulação no software ETAP19, onde foram inseridos os dados dos equipamentos utilizados no sistema para gerar os dados de distorção harmônica e analisá-los de acordo com as normas vigentes a fim de verificar a fidelidade da simulação.

Keywords—Qualidade de energia; Fotovoltaica; Distorção Harmônica; Sistema Fotovoltaico conectado à Rede.

I. Introdução

Os recursos de energias renováveis aumentaram significativamente nos últimos anos, em um esforço para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e alcançar a geração de eletricidade sustentável. O Brasil atingiu a marca histórica de 1 Giga Watt em geração distribuída. Essa marca é um resultado de um esforço da agência nacional de energia elétrica ANEEL que trabalha para viabilizar o acesso do consumidor a micro e minigeração de energia elétrica.

A fonte mais utilizada para micro e minigeração no Brasil é a solar fotovoltaica com cerca de 82 mil micro e miniusinas e com geração próxima de 870 megawatts de potência instalada.[1]

Com o crescimento da inserção da energia fotovoltaica e da geração distribuída, pesquisas estão sendo realizadas para avaliar os impactos dos sistemas fotovoltaicos no sistema de energia elétrica, especialmente seus impactos na qualidade da energia, regulação de tensão e proteção do sistema.

Com relação à qualidade da energia, o impacto da distorção harmônica dos sistemas fotovoltaicos é foco de vários

estudos [2-6] e merece especial atenção. A geração de harmônicos de um sistema fotovoltaico depende da tecnologia do inversor, irradiância solar, temperatura, cargas e as características do sistema de abastecimento [4]. De acordo com [7] a distorção harmônica gerada em plantas fotovoltaicas pode ocorrer como um resultado de efeitos intrínsecos e extrínsecos. Intrinsecamente as distorções harmônicas estão relacionadas com deficiências do inversor, por exemplo, componentes, a não linearidades da malha de controle, medições imprecisas e resolução limitada do circuito de controle de chaveamento.

Os efeitos extrínsecos na forma de onda de uma planta fotovoltaica incluem os efeitos da conexão a uma rede elétrica distorcida. Uma rede distorcida gera problemas no sistema de controle do inversor, causando distorção na forma de onda do inversor.

Simuladores são ferramentas interessantes durante a fase de projetos. Com eles é possível analisar de diversas formas o funcionamento de um sistema. Assim sendo, é importante agir de forma preventiva afim de reduzir os problemas de qualidade de energia causados por sistemas fotovoltaicos. Para isso, é possível utilizar os simuladores e simular esses sistemas para analisar a interação deles com a rede de distribuição.

Este estudo teve como objetivo fazer a simulação de um sistema fotovoltaico conectado a rede e observar a fidelidade da simulação aos parâmetros dos equipamentos e também analisar a qualidade dos dados produzidos por um simulador.

(1) Graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade La Salle de Canoas/RS. Artigo apresentado ao Bacharelado em Engenharia Elétrica como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel.

(2) Prof. MSc. Orientador e Professor dos cursos de Engenharia de Computação, Elétrica e Telecomunicações da Universidade La Salle de Canoas/RS.

II. Geração Distribuída

Os estímulos da geração distribuída justificam-se devido aos benefícios que essa modalidade proporciona ao sistema elétrico. Entre eles estão o adiamento de investimento em expansão dos sistemas, o baixo impacto ambiental, a minimização de perdas e a diversificação da matriz energética. No Brasil os consumidores podem gerar sua própria energia a partir de fontes renováveis desde 17 de abril de 2012 com a entrada em vigor da Resolução Normativa ANEEL nº482/2012, que estabelece as condições para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica.[8]

A transformação da matriz energética com uma maior participação de fontes renováveis deve ocorrer de forma gradual, com participação maior das fontes renováveis. Esse novo modelo exigirá outro perfil das fontes de energia que mudará de concentrado para um perfil disperso, tornando necessário também a comunicação entre as diferentes fontes e cargas que estão espalhadas pelo sistema. A geração distribuída pode ser uma possível solução para problemas econômicos e ambientais e para expansão do sistema elétrico baseado em grandes fontes geradoras distantes dos pontos de consumo. Os geradores distribuídos podem apresentar potências que variam de alguns quilowatts até centenas de megawatts, sendo localizados próximos aos pontos de consumo. O espalhamento das fontes geradoras no sistema elétrico pode causar alguns problemas relacionados à qualidade de energia e o mau funcionamento das proteções do sistema. Como alternativa para reduzir os efeitos indesejados e ter um melhor aproveitamento das vantagens desse sistema é possível ver as fontes distribuídas e suas cargas como redes de distribuição menores denominadas microrredes, como visto na fig. 1. [9]

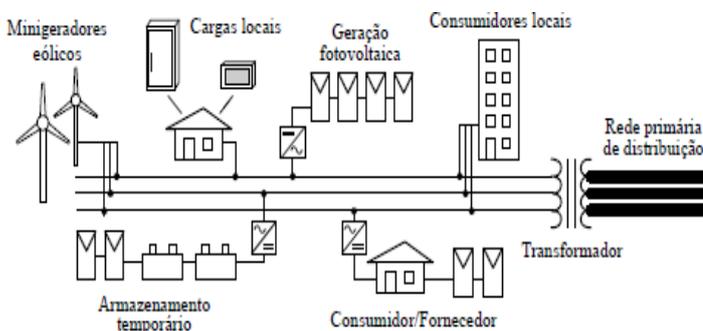


Figura 1: Modelo de uma microrrede [9]

A implementação de microrredes permite o emprego de diversos tipos de fontes renováveis sem alterações significativas na rede existente. Além disso, por possuir diversas unidades de geração e armazenamento de energia, é

possível o uso de sistemas de gerenciamento local para otimizar os sistemas, melhorando a qualidade, a confiabilidade e o gerenciamento.

Entretanto, microrredes ainda são um novo conceito e estão sendo extensivamente estudadas para entender os detalhes de operação e controle. A informação nessas redes tem um papel muito importante, pois, um número muito grande de geradores de baixa potência conectados a uma mesma rede requer coordenação e sincronismo entre as unidades para que seu uso seja otimizado. Desta forma, surge um outro conceito importante denominado *smartgrid* ou redes inteligentes. Em uma *smartgrid* são incorporadas diversas tecnologias com o intuito de melhorar o desempenho da rede.

Fontes distribuídas devem atender as exigências definidas pelas normas, garantindo a segurança e a confiabilidade das redes. Geralmente as normas locais de regulação pelas concessionárias possuem semelhanças, todavia, existe um grande esforço de comitês e de associações internacionais para criar um padrão em que os requisitos de qualidade sejam aplicados de forma global.[9]

III. Qualidade de Energia

Antigamente a natureza das cargas conectadas e a rede elétrica não geravam preocupações com a qualidade de energia. Nos dias de hoje, o avanço tecnológico no campo da eletrônica de potência trouxe o emprego cada vez mais frequente de circuitos chaveados nos equipamentos eletrônicos.

Por outro lado, toda essa tecnologia pode resultar em problemas de qualidade de energia, pois as cargas que antes eram lineares passam a ser cargas não lineares. Tais cargas distorcem as formas de onda de tensão e de corrente, gerando diversos problemas de qualidade de energia, e, principalmente, problemas relacionados a distorções harmônicas.[10] Tais fenômenos também podem ser vistos em inversores fotovoltaicos, visto que esses equipamentos possuem circuitos chaveados e as condições de funcionamento desses circuitos estão condicionadas a rede onde o inversor está conectado e a parâmetros de irradiação que afetam a tensão de entrada do inversor o que pode gerar fortes distorções na saída do equipamento.

Para que qualquer sistema de energia possa oferecer aos usuários eletricidade em níveis aceitáveis é necessário que esses níveis sejam normatizados com o objetivo de garantir a integridade e a eficiência dos subsistemas a ele conectados. Abaixo, seguem os principais procedimentos e normas vigentes no Brasil que regem a qualidade de energia e a conformidade dos equipamentos:

- *Procedimentos de Distribuição MODULO 8 (PRODIST 8)*

- *ABNT-NBR 16.149* – Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição.
- *ABNT-NBR 16.150* - Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição – Procedimento de conformidade

IV. Metodologia

A. Modelo da simulação

Este artigo analisa a simulação de um sistema fotovoltaico conectado à rede como ferramenta de simulação. Utilizou-se o software ETAP19 – o modelo utilizado para a simulação é mostrado na fig. 2. A modelagem e a simulação com o ETAP foi feita com base nos dados fornecidos pelo fabricante dos componentes usados no sistema fotovoltaico modelado.

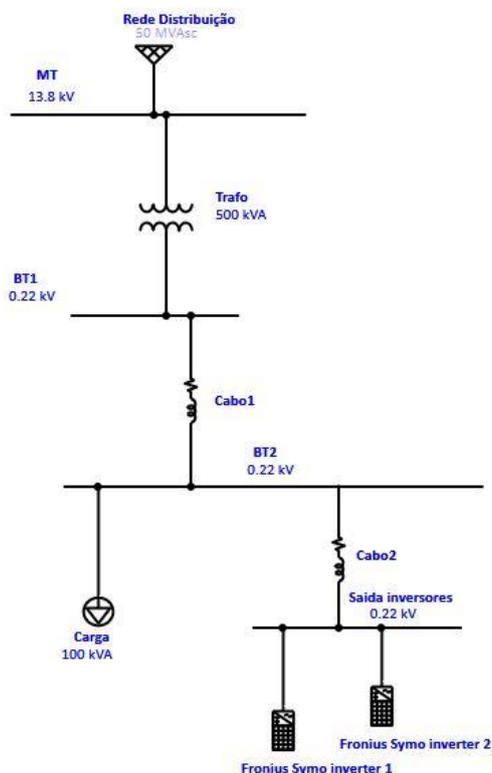


Figura 2: Modelo simulado no ETAP19.

B. Componentes do sistema

O inversor usado na simulação no software foi o Fronius Symo 20.0-3 fabricado pela Fronius e comercializado no Brasil desde 2013. O inversor possui as seguintes especificações [9]:

- Potência nominal, $S_n = 20[\text{kVA}]$.
- Corrente máxima de entrada, $I_{max} = 19,8[\text{A}]$.
- Tensão de entrada, V_{dc} de $200[\text{V}]$ até $600[\text{V}]$.
- Faixa de tensão de saída, V_{ca} de $150[\text{V}]$ até $280[\text{V}]$.
- Corrente máxima de saída, $28,9[\text{A}]$.
- Fator de potência
- Eficiência η de $91,9\%$ até $97,6\%$
- Distorção harmônica total $1,3\%$
- Operação On-Grid

O inversor Fronius Symo pode ser visto na figura 3.



Figura 3: Fronius Symo 20.0-3[9].

Para simulação dos painéis fotovoltaicos utilizou-se como exemplo os painéis KD235GX-LPB fabricados pela Kyocera. A quantidade de painéis simulada foi parametrizada de modo que a tensão de saída do conjunto atendesse os parâmetros de entrada do inversor, totalizando um arranjo com 84 unidades.

Especificações para cada painel [10]:

- Potência Nominal, $169 [\text{W}]$.
 - Tensão no ponto máximo, $29,8 [\text{V}]$.
 - Corrente no ponto máximo, $7,89 [\text{A}]$.
- O painel fotovoltaico KD235GX-LPB ser visto na figura 4.

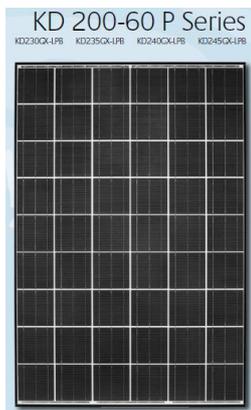


Figura 4: Painel Kyocera KD235GX-LPB [10].

C. Simulações do modelo

Após a pesquisa das informações dos componentes do sistema fotovoltaico, os dados foram inseridos no software e realizou-se uma análise do fluxo de carga do modelo utilizado. Primeiramente, foi feita a simulação do modelo sem a conexão dos inversores. O resultado da análise com os inversores desconectados pode ser visto na figura 5.

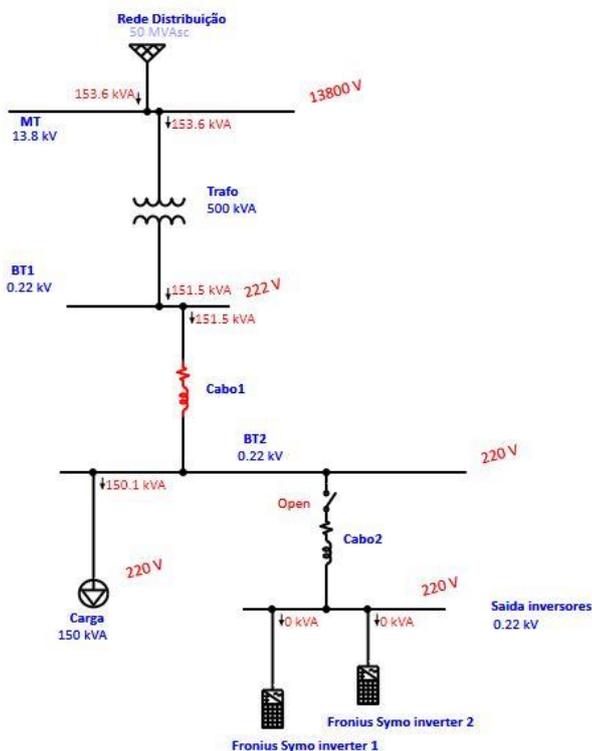


Figura 5: Fluxo de carga com inversores desconectados.

Após a realização da simulação com os equipamentos desconectados, efetuou-se a conexão dos mesmos à rede e a simulação foi feita novamente. A simulação pode ser vista na figura 6.

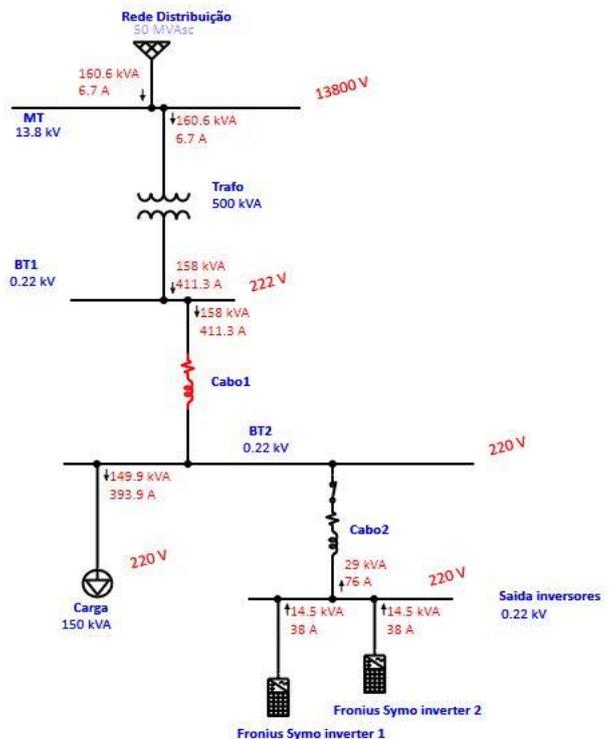


Figura 6: Fluxo de carga com inversores conectados à rede.

D. Análise de harmônicos

A ABNT NBR 16.149 de 2013 tem por objetivo padronizar a interface de conexão entre a geração fotovoltaica e a rede de distribuição. Considerando esse objetivo, são estabelecidos os requisitos mínimos de operação para os inversores utilizados nesses sistemas. [14].

Conforme as normas atuais da ABNT, a distorção harmônica total deve ser inferior a 5% da potência nominal do sistema e para componente a harmônica deve ser limitada aos valores da tabela 1 [14].

Tabela 1
Limites de distorção harmônica de corrente:

| Harmônicas ímpares | Limite de distorção |
|--------------------|---------------------|
| 3° a 9° | < 4,0 % |
| 11° a 15° | < 2,0 % |
| 17° a 21° | < 1,5 % |
| 23° a 33° | < 0,6 % |
| Harmônicas Pares | Limite de distorção |
| 2° a 8° | < 1,0 % |
| 10° a 32° | < 0,5 % |

De acordo com a NBR 16.150[15], a distorção harmônica total deve ficar abaixo de 2,5%, para inversores conectados à rede. Esse critério é aplicado para análise de problemas no ponto de conexão com a rede elétrica.

Distorção harmônica da tensão no ponto de conexão com a rede pode ser vista na figura 7.

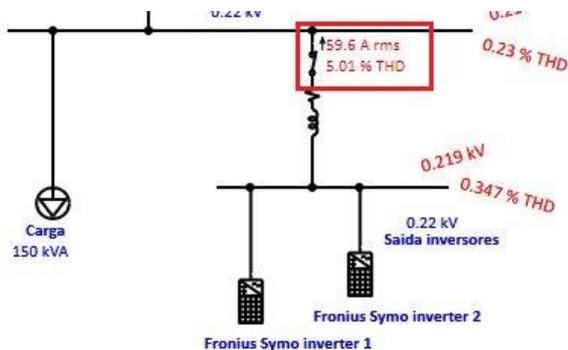


Fig. 7 Distorção harmônica total da tensão.

O espectro das harmônicas pode ser visto na figura 8.

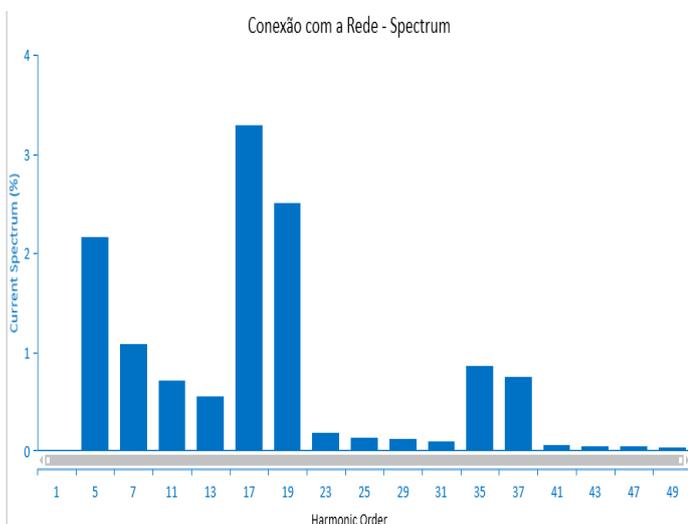


Fig. 8 Distorção harmônica total da tensão

Na tabela 2, seguem os valores extraídos do espectro de harmônicas da corrente.

Tabela 2

Valores extraídos do espectro de harmônicas

| Harmonic Order | Current Spectrum (%) |
|----------------|----------------------|
| 1 | 0 |
| 5 | 2.165338278 |

| | |
|----|-------------|
| 7 | 1.078213692 |
| 11 | 0.706505477 |
| 13 | 0.546907723 |
| 17 | 3.284932375 |
| 19 | 2.500080585 |
| 23 | 0.179313362 |
| 25 | 0.140769884 |
| 29 | 0.117922403 |
| 31 | 0.09859287 |
| 35 | 0.854148746 |
| 37 | 0.752158344 |
| 41 | 0.063008986 |
| 43 | 0.053797167 |
| 47 | 0.049136084 |
| 49 | 0.040856518 |

A forma de onda da corrente pode ser vista na figura X.



Fig. X Forma de onda da corrente.

V. Análise e Discussão

Em relação aos valores encontrados na simulação, a potência entregue pelo inversor simulado foi de 16500[W], com 17630 [W] de pico máximo fornecido pela simulação dos painéis. Considerando a eficiência informada, os resultados foram consistentes com a potência fornecida para a rede.

Analisando a distorção harmônica total apresentada na figura 7, é possível afirmar que o valor está acima do estabelecido pela norma [14].

Em relação as distorções de corrente, os resultados ficaram dentro dos valores normatizados [15]. Percebe-se a presença de diversos harmônicos ímpares e isso se dá devido à

caracterização do inversor que não representa o comportamento real do equipamento.

Os resultados obtidos através da simulação não foram precisos devido a algumas limitações do software, como por exemplo, os parâmetros de irradiação que são fixos e não representam o comportamento de um sistema real. Outro fator que interferiu na parametrização da simulação foi a caracterização correta do comportamento harmônico do inversor. Essa caracterização deve ser inserida nas configurações do software para que as formas de onda do inversor sejam mais fiéis possíveis com as de um inversor real. Devido à indisponibilidade dos dados de comportamento dos circuitos chaveados dos inversores, os fabricantes não disponibilizam tais detalhes e a biblioteca de software não dispõe das informações corretas, afetando assim a simulação.

Outra questão importante em relação a simulação é o fato de que o software simula apenas um ciclo, o que não serve para análises mais profundas da qualidade da energia gerada. Diferentemente dos equipamentos analisadores de energia que fazem a aquisição de uma grande quantidade de dados e os consolida para exibir em gráficos mais elaborados. O exemplo de uma análise da distorção total realizada por um analisador pode ser vista na figura 9.

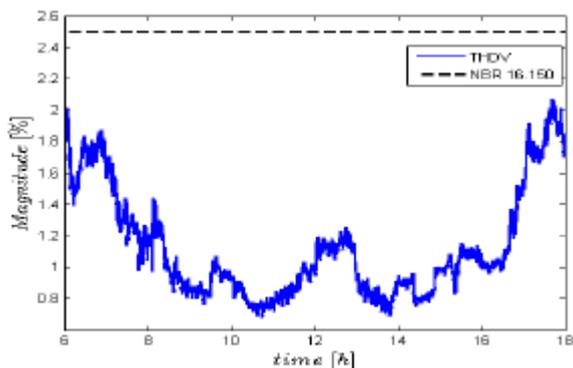


Fig. 9 Gráfico da distorção de um analisador de energia [6]

Na figura, pode ser visto na parte inferior, o tempo em horas da aquisição realizada o que torna o analisador de energia o equipamento ideal para realizar as avaliações de qualidade de energia.

VI. Conclusão

Analisando os resultados obtidos, constatou-se que a simulação não foi satisfatória para a análise de qualidade de energia em comparação com um estudo realizado com equipamento próprio para este fim[6]. Constatou-se com a pesquisa que o desempenho dos inversores é dependente das condições de irradiação. Essas variações no desempenho não

são percebidas em uma simulação devido a forma como o software processa as informações. Mesmo assim, a simulação mostra-se importante durante a fase de projeto de um sistema, auxiliando na previsão de falhas e de desequilíbrios na energia gerada e auxiliando no dimensionamento de filtros para a mitigação dos problemas relacionados a qualidade de energia. Em suma, a simulação de um sistema fotovoltaico não descarta uma posterior análise da qualidade de energia com um equipamento apropriado para este fim.

No que se refere à geração distribuída, a distorção harmônica é um ponto importante, pois com o aumento do uso de inversores nas redes inteligentes as distorções harmônicas não controladas acarretarão a diminuição da qualidade da energia, gerando prejuízos para o sistema e para os equipamentos a ele conectados. Desta forma, é de extrema importância a ampliação de pesquisas neste campo para permitir o crescimento sustentável dos sistemas no Brasil e no mundo.

VII. Trabalhos futuros

A partir deste trabalho, percebe-se que o tema qualidade de energia em sistemas fotovoltaicos possui diferentes possibilidades de continuidade. Os simuladores podem melhorar as opções de simulação, prevendo mais condições de irradiação e os fabricantes de inversores podem disponibilizar bibliotecas de equipamentos para uso em softwares de simulação para que a simulação possa representar melhor o comportamento do circuito de chaveamento. Abaixo, seguem algumas propostas de continuidade dos estudos:

- Pesquisa de estratégias de filtragem de harmônicos com uso de filtros.
- Melhoria das condições de parametrização da simulação com inclusão de padrões de irradiação.
- Estudo comparativo entre as medições obtidas em uma simulação e as medições obtidas pelos analisadores de energia.
- Uso sistemas fotovoltaicos isolados por transformador como estratégia para reduzir a produção de harmônicos na rede elétrica.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL, Brasil ultrapassa marca de 1 GW em geração distribuída. Disponível em: < https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/id/18723889 > Acesso em: 01/07/2021
- [2] F. Batrinu, G. Chicco, J. Schlabbach and F. Spertino, "Impacts of grid-connected photovoltaic plant operation on the harmonic distortion," MELECON 2006 - 2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, 2006, pp. 861-864, doi: 10.1109/MELCON.2006.1653234.
- [3] M. Kopicka, M. Ptacek and P. Toman, "Analysis of the power quality and the impact of photovoltaic power plant operation on low-voltage distribution network," 2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 2014, pp. 99-102, doi: 10.1109/PQ.2014.6866792.
- [4] X. Zhou, P. Huang, W. Yu, Y. Feng, Z. Qian and P. Yang, "The control strategy of Harmonic suppression of Photovoltaic grid-connected inverter based on PI+MPR," 2019 4th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/eGRID48402.2019.9092748.
- [5] O. Ceaki, R. Vatu, M. Mancasi, R. Porumb and G. Seritan, "Analysis of electromagnetic disturbances for grid-connected PV plants," 2015 Modern Electric Power Systems (MEPS), 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/MEPS.2015.7477165.
- [6] G. L. Reis et al., "Comparative analysis of power quality in commercial inverters applied to photovoltaic systems," 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2015, pp. 1-8, doi: 10.1109/COBEP.2015.7420197.
- [7] T. Abeyasekera, C. M. Johnson, D. J. Atkinson and M. Armstrong, "Suppression of line voltage related distortion in current controlled grid connected inverters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, no. 6, pp. 1393-1401, Nov. 2005, doi: 10.1109/TPEL.2005.857557.
- [8] ANEEL, Geração Distribuída Disponível em: < <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida> > Acesso em: 01/07/2021
- [9] Marangoni, F. Inversores Monofásicos para conexão de sistemas Fotovoltaicos à rede. Dissertação de mestrado, UTFPR. Pato Branco: 2012.
- [10] Cavalheiro, I. Análise das distorções harmônicas geradas pelo acionamento de um motor elétrico através de um inversor de frequência. Dissertação de mestrado, UNIPAMPA. Alegrete: 2014.
- [11] ANEEL, PRODIST – Modulo 8 Disponível em: < <https://www.aneel.gov.br/modulo-8> > Acesso em: 01/07/2021
- [12] Fronius Brasil. *O inversor à prova do futuro para os sistemas de pequeno porte e de auto-consumo*. Disponível em: < <https://www.fronius.com/pt-br/brasil/energia-solar/instaladores-e-parceiros/dados-tecnicos/todos-os-produtos/inversor/fronius-symo/fronius-symo-20-0-3-m> > Acesso em: 01/07/2021
- [13] Kyocera KD235GX-LPB Solar Panels. Disponível em: < <https://www.solarelectricsupply.com/kyocera-kd235gx-lpb-solar-panels-94> > Acesso em 03/07/2021
- [14] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 16.149: *Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição*. Rio de Janeiro, 2013
- [15] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 16.150: *Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição - Procedimento de ensaio de conformidade*. Rio de Janeiro, 2013