

Grupo de Estudo de Geração Eólica, Solar e Armazenamento-GES

MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE ENERGIA EM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA - ANÁLISE DAS CAMPANHAS DE MEDIÇÃO DE TENSÃO E CORRENTE E CARACTERÍSTICAS DE INJEÇÃO DE HARMÔNICOS DOS SISTEMAS DE BAIXA, MÉDIA E ALTA TENSÃO

Nelson Clodoaldo de Jesus*; João Roberto Cogo; Luiz Marlus Duarte; Jesus Daniel de Oliveira

Luis Fernando Ribeiro Ferreira; Éverson Júnior de Mendonça; Leandro Martins Fernandes

GSi - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA

RESUMO

Este Informe Técnico tem como objetivo apresentar uma avaliação da qualidade da energia elétrica em um sistema de geração de energia fotovoltaica, com potência instalada de 150 MW. Serão apresentados os resultados obtidos nas campanhas de medição no ponto de conexão em 138 kV, considerando as medições em condições de pré e pós-operação do sistema, portanto, para verificar os indicadores de desempenho para as condições antes e após a entrada em operação do empreendimento. Resultados específicos obtidos nas medições internas ao sistema de geração de energia, incluindo a subestação coletora em 138 e 34,5 kV, além dos inversores de frequência conectados em 600 V, serão abordados neste trabalho. Serão detalhados os comportamentos obtidos no monitoramento e comparação dos resultados obtidos com os indicadores de qualidade da energia recomendados, bem como as principais características de desempenho e perfil harmônico do sistema elétrico em análise.

PALAVRAS-CHAVE

Campanhas de Medição, Qualidade da Energia Elétrica, Geração Fotovoltaica, Harmônicos, Inter Harmônicos.

1.0 - INTRODUÇÃO

A geração centralizada de energia fotovoltaica, composta por projetos de usinas de grande porte, assim como tantas outras aplicações da tecnologia solar fotovoltaica no Brasil, tem se consolidado cada vez mais como uma fonte renovável de geração de energia elétrica (QEE) com alto valor agregado à sociedade brasileira (1).

A conexão de sistemas de geração de energia renováveis se apresenta cada vez mais presente em sistemas elétricos de um modo geral, sendo necessário o atendimento aos requisitos técnicos e regulatórios. Neste sentido, estudos e medições de qualidade de energia se constituem importantes ferramentas relacionadas aos aspectos de dimensionamento e análise do desempenho operacional do sistema frente a sistemas intermitentes. Este trabalho descreve as considerações associadas ao monitoramento da qualidade de energia, incluindo o ponto de conexão com a subestação de fronteira e internamente, por meio de campanhas de medição das tensões e correntes, de modo a apresentar o real comportamento harmônico do sistema sem e com a operação do completo fotovoltaico.

2.0 - CAMPANHAS DE MEDIÇÃO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A avaliação dos indicadores em regime permanente foi realizada considerando um período de 7 (sete) dias consecutivos, adotando-se os limites estabelecidos pelo Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede e os requisitos apresentados nas Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Acessos à Rede Básica ou nos Barramentos de Fronteira com a Rede Básica para Parques Eólicos, Solares, Consumidores Livres e Distribuidoras, do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), conforme (2) e (3).

Os aspectos considerados na avaliação dos resultados obtidos durante as medições em regime permanente e indicadores de QEE referem-se ao comportamento das tensões e correntes eficazes, harmônicos, desequilíbrios de tensão, flutuações de tensão e potências, em função da análise de cada monitoramento, conforme apresentado a seguir.

Os resultados destas medições foram utilizados para verificar o comportamento das grandezas elétricas e o desempenho do sistema por meio da análise comparativa dos resultados obtidos entre as medições e os valores limites recomendados (2),(4) (5). As correntes no lado de 138 [kV] do banco de autotransformadores TR, instalado na SE GETULINA também foram medidas em ambas as campanhas de medição, a título de análise comparativa.

A Figura 1 apresenta o diagrama unifilar simplificado indicando os pontos onde foram realizadas as medições de QEE, relacionadas configuração adotada durante as campanhas de medições das correntes injetadas pelos inversores de frequências instalados no complexo de geração fotovoltaica.

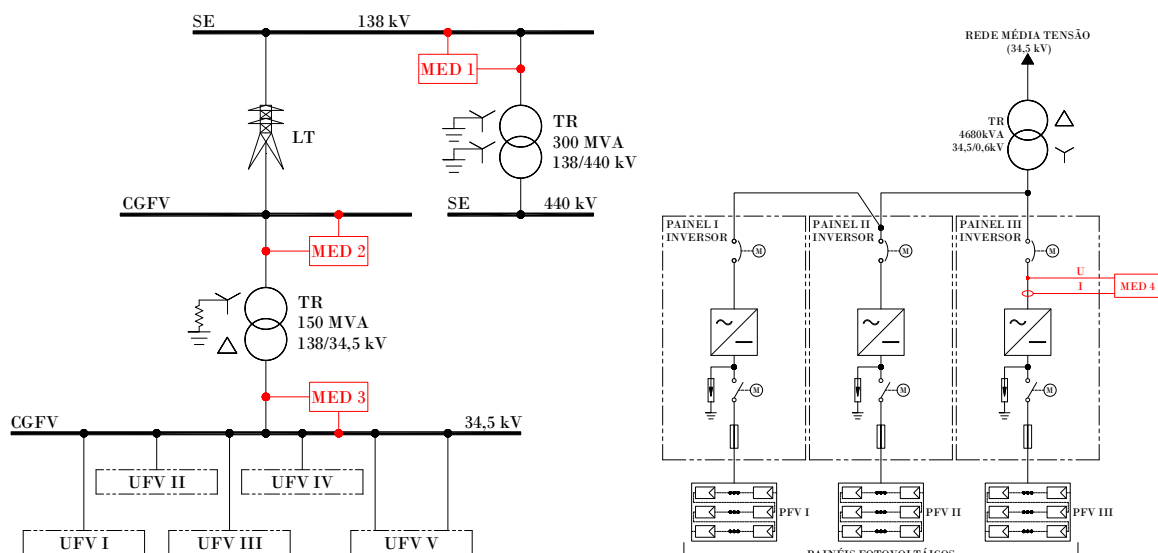


FIGURA 1 - Diagramas unifilares simplificados indicando os pontos de medição da QEE.

O primeiro monitoramento foi realizado no ponto de acoplamento comum ao sistema interligado, utilizando os Transformadores de Potencial (TPs) e Transformadores de Corrente (TCs) associados ao “bay” de conexão de um banco de autotransformadores em 138 kV, com potência nominal de 300 MVA, no período compreendido entre às 14h de 08/12/2017 e às 14h de 15/12/2017, portanto, antes da entrada em operação das usinas fotovoltaicas.

As medições no ponto de acoplamento foram realizadas com o objetivo verificar o comportamento dos indicadores em comparação aos valores recomendados (2). Após a instalação, comissionamento e entrada em operação de todas as 5 usinas do Complexo Fotovoltaico, realizou-se uma nova medição no intervalo entre às 08h de 23/04/2018 e às 8h de 30/04/2018, adotando-se o mesmo ponto de conexão e medidor de qualidade da energia elétrica. Adicionalmente, serão apresentados os comportamentos das grandezas elétricas medidas internamente ao sistema de geração, incluindo a análise de harmônicos injetados pelos inversores de frequência utilizados na conversão de energia dos painéis fotovoltaicos. A Figura 2 ilustra o comportamento da potência demandada pela usina durante o mesmo período da segunda campanha de medição (pós-operação), observando neste período de monitoramento, uma condição de geração de potência máxima com valor próximo a 130 MW.

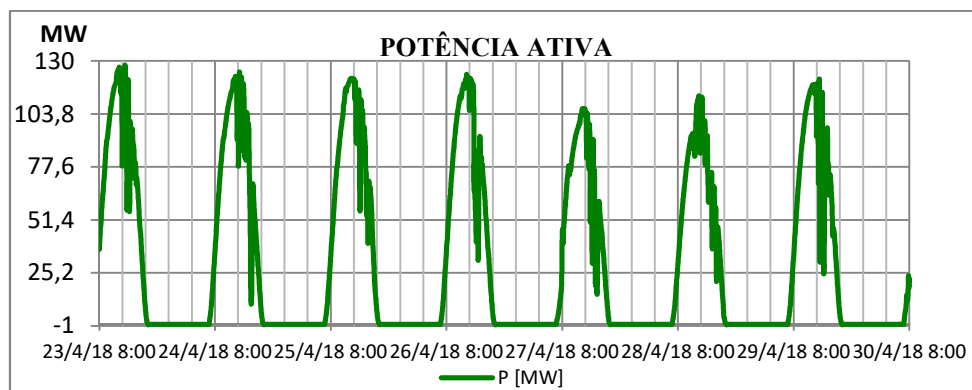


FIGURA 2 - Comportamento da potência ativa média gerada pela usina fotovoltaica.

2.1 Medições na Subestação de Conexão com o Sistema Interligado (MED 1)

A Figura 3 mostra a comparação entre os indicadores relativos a Distorção Total de Tensão devido aos harmônicos, com ligeira redução observada na campanha de medição após a entrada em operação das 5 usinas fotovoltaicas. De qualquer modo, em ambos os casos os valores máximos dos indicadores permaneceram inferiores até mesmo ao limite individual de 1,5%, ou seja, apresentam-se totalmente adequados em relação à qualidade e conformidade das formas de onda das tensões do sistema. Na mesma Figura, apresentam-se os indicadores relacionados aos desequilíbrios das tensões, também com resultados adequados e valores bem inferiores aos limites recomendados.

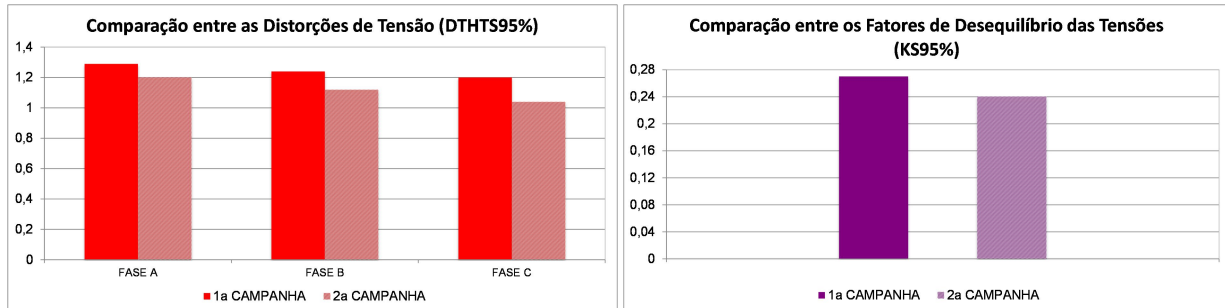


FIGURA 3 – Comparação entre os indicadores das distorções e desequilíbrios.

Já em relação aos indicadores relacionados à flutuação de tensão quanto a cintilação luminosa (Flicker) de curta e longa duração (Pst e Plt), os valores permaneceram praticamente inalterados, conforme mostrado na Figura 4.

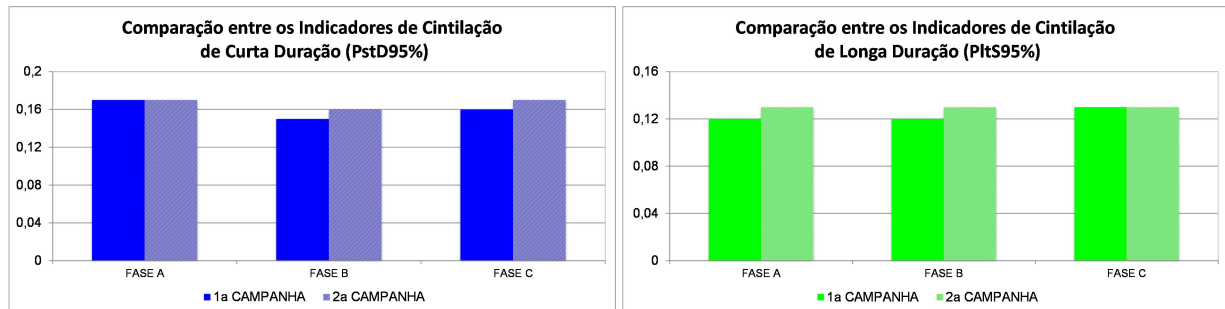


FIGURA 4 - Comparação entre os indicadores de flutuação de tensão.

Como forma de demonstrar o comportamento harmônico das tensões do sistema, apresentam-se na Figura 5 as distorções das tensões durante as campanhas de medição, antes e após a entrada em operação do sistema de geração fotovoltaico, sendo que em ambos os períodos das medições, as máximas distorções permaneceram inferiores a 1,4%, ou seja, inferiores aos limites recomendados (2).

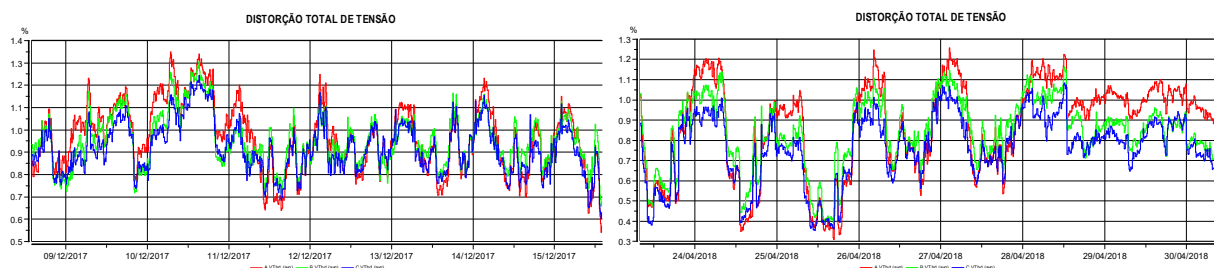


FIGURA 5 - Resultados das distorções das tensões nas campanhas de medição pré e pós-operação (AT).

A Figura 6 a seguir mostra a comparação por fase dos componentes harmônicos obtidos a partir dos percentis de 95% para cada ordem, na primeira (sem a operação da UfV) e na segunda campanha de medição de QEE (com a operação da UfV), mostrando novamente comportamentos similares em relação às distorções das tensões e componentes harmônicos individuais nos períodos analisados durante a realização das duas campanhas de medição de QEE. Os componentes preponderantes foram os de 3ª, 5ª e 7ª ordens, destacando-se ainda o componente de 48ª ordem, sendo registrado somente na segunda campanha de medição, ou seja, com a influência da conexão e operação do sistema de geração fotovoltaico.

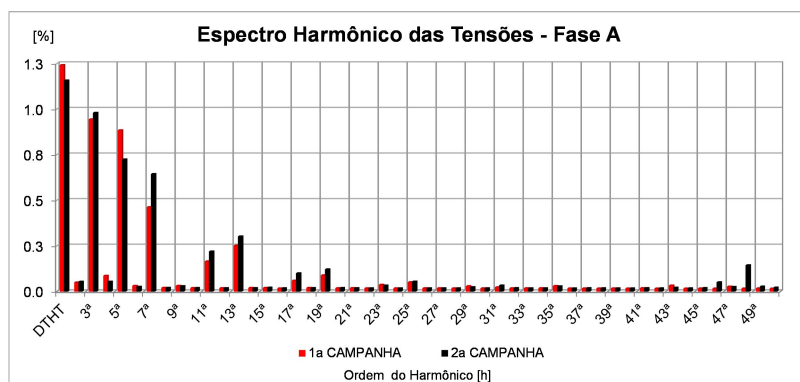


FIGURA 6 - Comparação entre os indicadores das distorções e componentes harmônicos das tensões da fase A.

Outro parâmetro considerado nas medições foi às distorções das correntes medidas no mesmo ponto de análise, sendo inicialmente realizada uma comparação entre as distorções das correntes em pu da corrente máxima obtida em cada monitoramento (Total Demand Distortion - TDD) (4),(6), sendo que os valores máximos não apresentaram diferenças significativas, com valores máximos percentuais próximos a 4,5%. Por outro lado, a título de comparação, foram verificados os valores absolutos dos componentes harmônicos injetados (em A), sendo que na segunda campanha de medição ocorreu uma redução, conforme esclarece o gráfico da Figura 7.

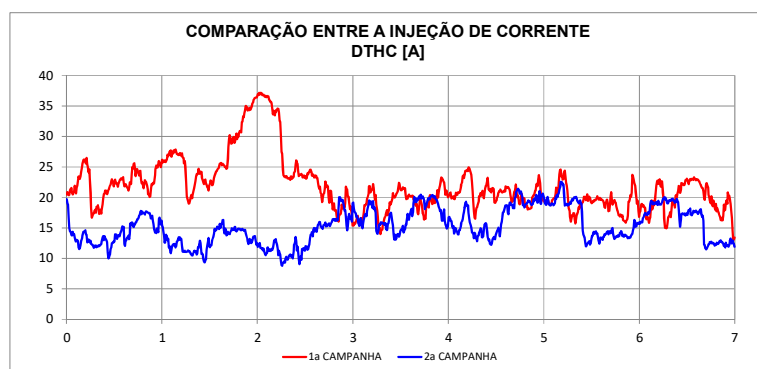


FIGURA 7 - Resultados das distorções das correntes nas campanhas de medição pré e pós-operação.

2.2 Medições na Subestação Coletora da Usina Fotovoltaica

Este item apresenta uma análise das medições com base nos dados obtidos na subestação coletora, apresentando alguns resultados amostrais do comportamento das potências e distorções das tensões e correntes medidas na subestação interna do complexo formado pelas usinas fotovoltaicas. Deste modo, serão destacadas a seguir, as potências, distorções e componentes harmônicos registrados nos lados de 138 kV e 34,5 kV.

2.2.1 - Medições em 138 kV (MED 2)

As potências ativa e reativa obtidas durante a medição em 138 kV estão apresentadas na Figura 8, seguida conjuntamente com as respectivas distorções das tensões e correntes, comprovando novamente valores inferiores aos recomendados, cuja condição operativa não constava com a presença de quaisquer filtros de harmônicos.

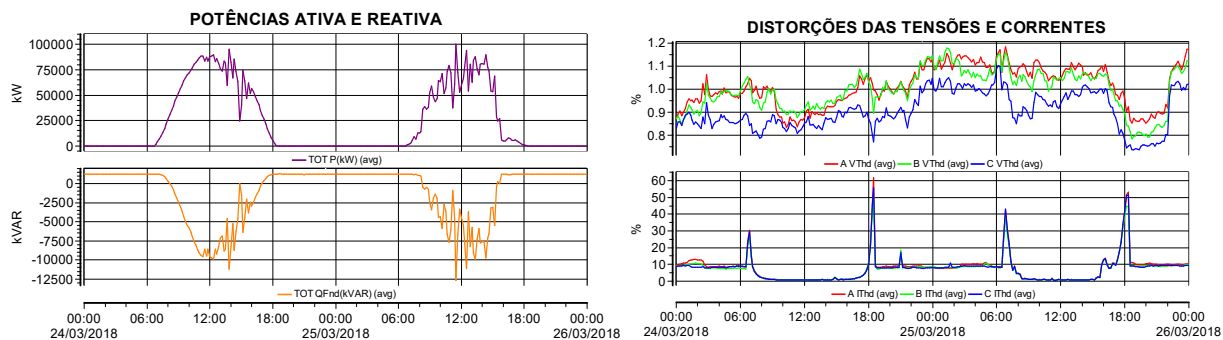


FIGURA 8 - Resultados das medições das potências e distorções na SE da Usina em 138 kV (AT).

As formas de ondas das tensões e correntes no lado de 138 kV durante os instantes coincidentes com os registros das maiores distorções das correntes (menor carregamento) e também para o instante de máximo carregamento estão apresentadas na Figura 9.

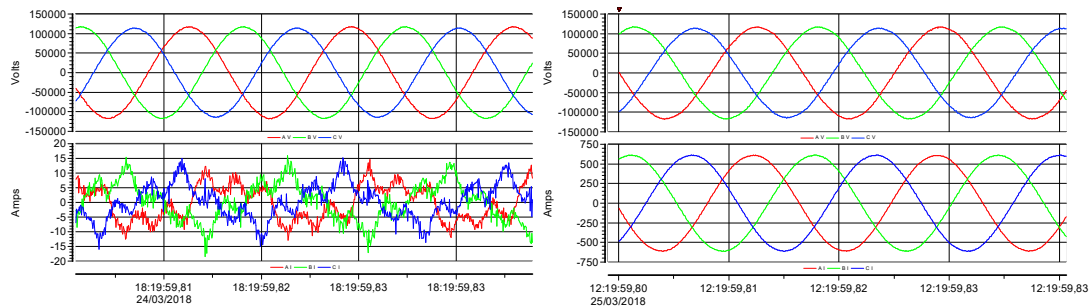


FIGURA 9 - Formas de onda das tensões e correntes em 138 kV nas condições de mínimo e máximo carregamento.

As distorções e os espectros harmônicos associados às formas de onda apresentadas anteriormente estão destacados em seguida. Observa-se que enquanto as distorções das tensões se mantêm praticamente constantes, na medida em que as correntes de operação aumentam, as respectivas distorções são reduzidas significativamente, conforme pode se verificar com o auxílio da Figura 10.

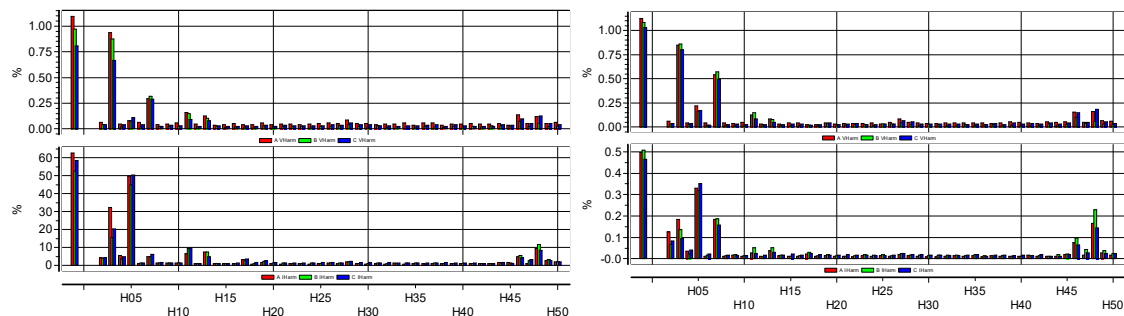


FIGURA 10 - Espectros harmônicos das tensões e correntes em 138 kV (mínimo e máximo carregamento).

2.2.2 - Medições em 34,5 kV (MED 3)

De forma complementar para outra condição de operação do sistema, as potências e distorções devido aos harmônicos, registradas durante uma medição no lado de 34,5 kV da subestação coletora, estão ilustradas na Figura 11. A Figura 12 mostra as formas de ondas das tensões e correntes para dois instantes de operação, coincidindo com o ponto de maior distorção das correntes e, em seguida, equivalente a máxima geração de energia neste período do monitoramento.

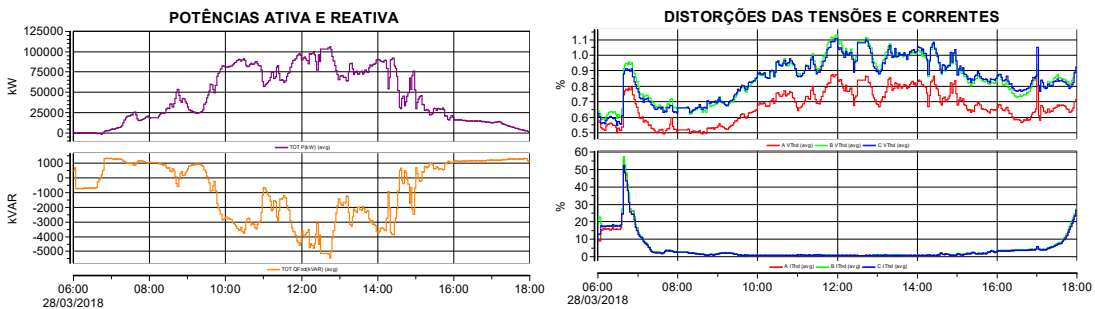


FIGURA 11 - Resultados das medições das potências e distorções na SE da Usina em 34,5 kV (MT)

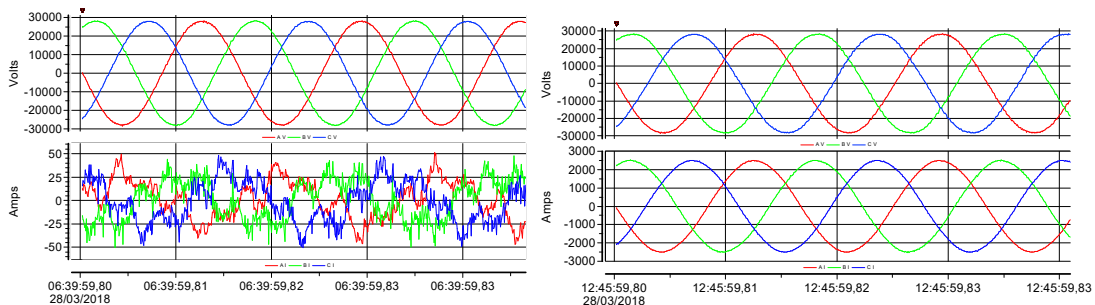


FIGURA 12 - Formas de onda das tensões e correntes em 34,5 kV nas condições de mínimo e máximo carregamento.

Analisando-se os espectros harmônicos no lado de 34,5 kV verificam-se resultados com comportamentos similares aos obtidos no lado de 138 kV, sendo as distorções das tensões mantidas com valores inferiores a 1,5 %, além das variações das distorções das correntes em função da potência demandada. Os componentes harmônicos mais significativos registrados nas tensões foram os componentes de 48^a, 5^a, 46^a e 7^a ordens. Já para as respectivas correntes, os componentes mais importantes registrados foram os de 5^a, 3^a e 48^a ordens.

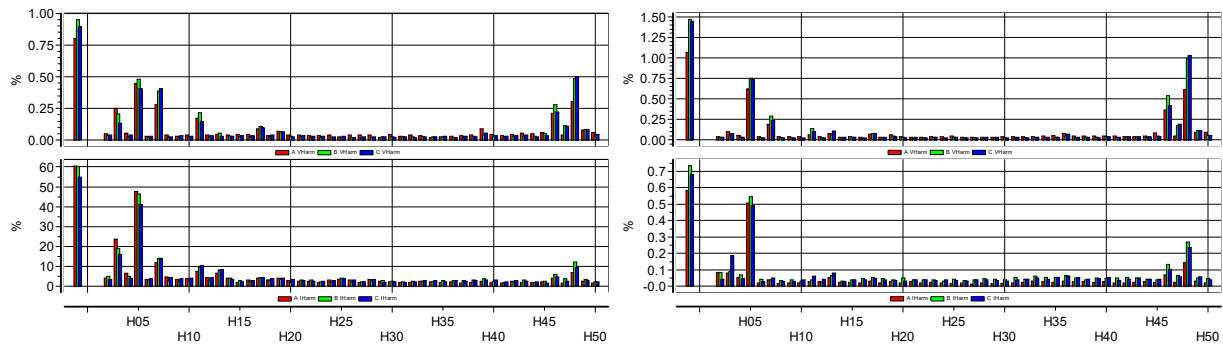


FIGURA 13 - Espectros harmônicos das tensões e correntes em 34,5 kV (mínimo e máximo carregamento).

2.2.3 Medições nos Inversores de Frequência das Centrais de Geração Fotovoltaicas em 600 V (MED 4)

Foram realizadas diversas medições nos inversores de frequência instaladas nas centrais de geração fotovoltaicas para as campanhas de medição das correntes, sendo realizadas amostras em pelo menos duas unidades em cada usina. Durante estas medições os inversores foram programados para atuarem com controle em modo de potência, variando-se cada patamar em 10%, por 10 minutos consecutivos desde a potência nula (P0) até a máxima de operação (Pmáx) (5). A Figura 14 apresenta os comportamentos registrados para as distorções das tensões e correntes no respectivo intervalo do monitoramento, bem como dos resultados das potências ativas obtidas na saída de um dos inversores conectado em 600 V.

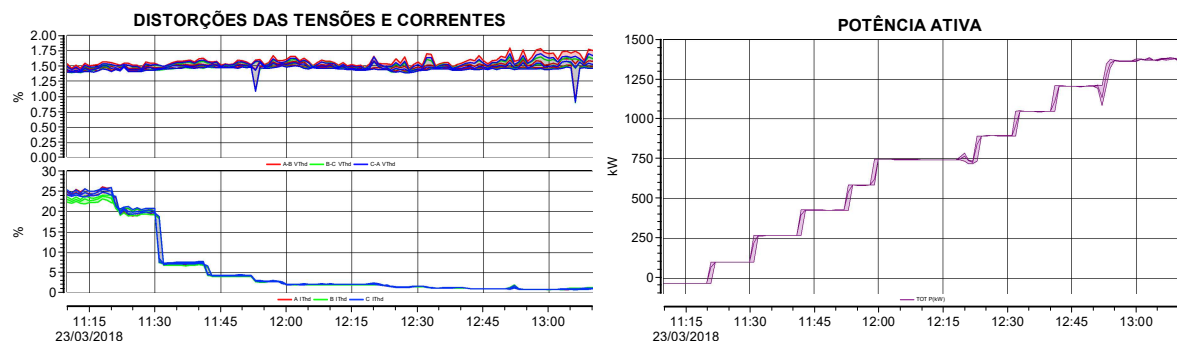


FIGURA 14 - Resultados das medições das distorções com controle da potência ativa do inversor (BT).

De modo a comparar o perfil harmônico das tensões e correntes para alguns patamares das potências dos inversores, a Figura 15 ilustra as formas de onda para referências de potência nula (P0) e 20% da nominal (P20).

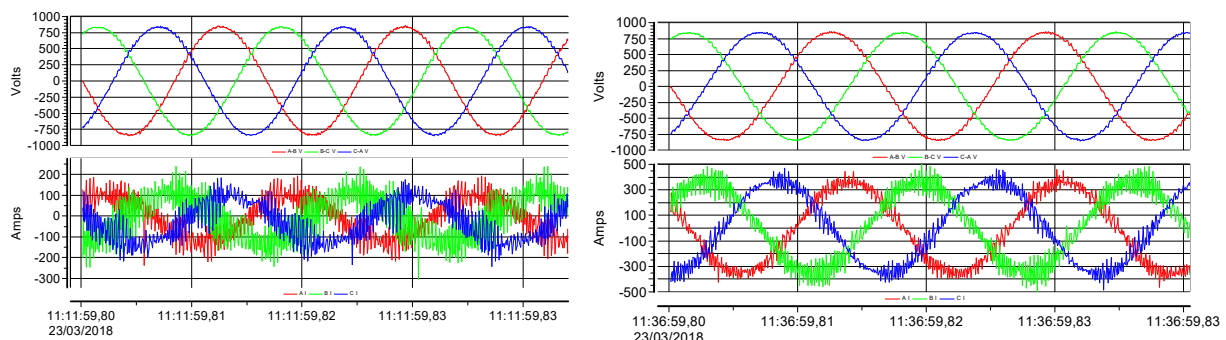


FIGURA 15 - Formas de onda das tensões e correntes com P = 0% e P=20% da nominal.

A decomposição das formas de onda para uma potência nula de operação (11:11:59.80) indica a presença de componentes harmônicos mais significativos tanto para as tensões quanto para as correntes, como sendo os harmônicos de 48^a e 46^a ordem, respectivamente.

Para as faixas de potências de referência (P0 e P20) os componentes harmônicos das tensões não sofrem alterações, mas para as respectivas correntes, ocorre uma redução significativa no valor da distorção total, mantendo-se os mesmos harmônicos individuais preponderantes, conforme ilustra a Figura 16.

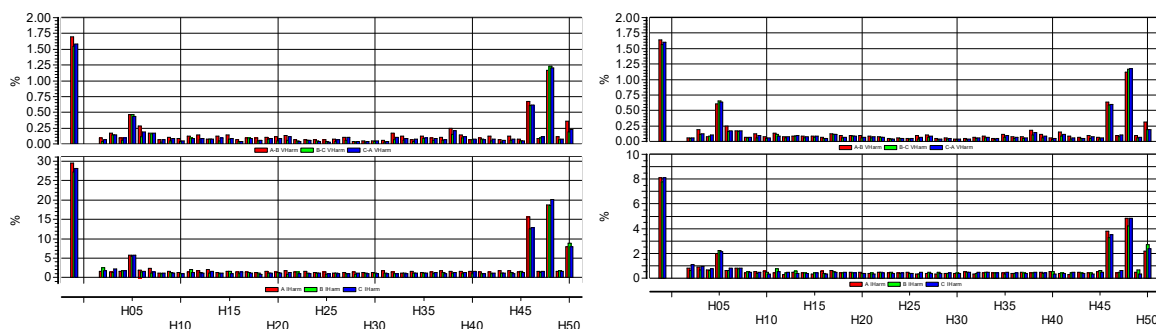


FIGURA 16 - Espectros harmônicos das tensões e correntes com P = 0% e P=20% da nominal.

A Figura 17 apresenta as formas de onda das tensões e correntes obtidas para potências de referência de 50% (P50) e de 100% do valor nominal (P100). Com base na Figura 18, destaca-se, novamente, que os valores médios dos espectros harmônicos das tensões não sofrem alterações substanciais, mas com o aumento do carregamento, as distorções das correntes são fortemente reduzidas, alterando inclusive os componentes característicos, pois para as condições de operação com as máximas correntes, o componente típico de 5ª ordem supera o componente de 48ª ordem, presente nas tensões do sistema, especialmente, quando da operação com correntes equivalentes a carregamentos reduzidos.

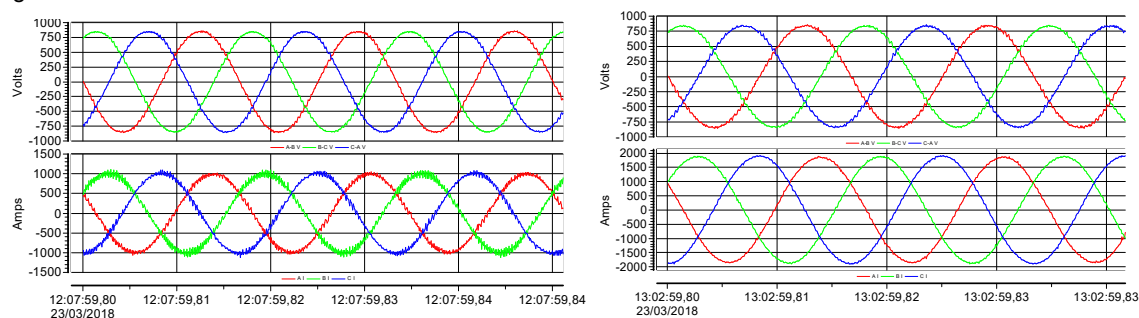


FIGURA 17 - Formas de onda das tensões e correntes com P = 50% da nominal (P50) e P=Máx (P100).

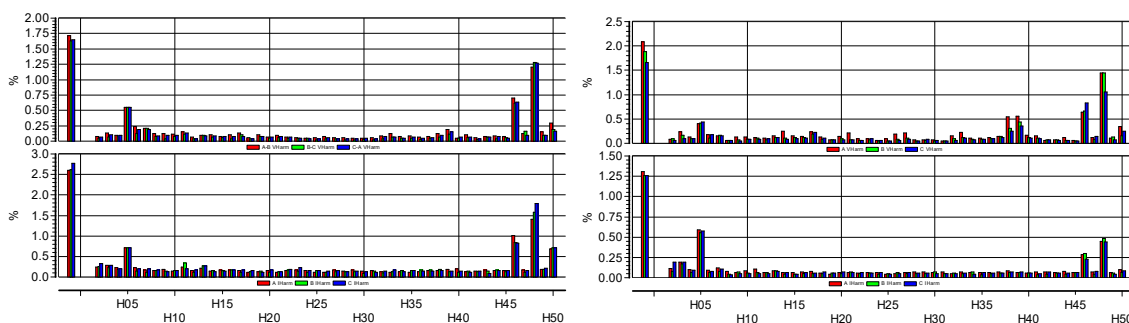


FIGURA 18 - Espectros harmônicos das tensões e correntes com P = 50% da nominal (P50) e P=Máx (P100).

De modo comparativo entre as amostras aquisitivas nas cinco usinas de geração fotovoltaica, a Figura 19 mostra os resultados das distorções das correntes para cada componente individual, considerando os valores equivalentes ao percentis de 95%, tomando-se com base as médias quadráticas das amostras obtidas nas campanhas de medição das correntes dos inversores, com valor em pu da base nominal, com resultados inferiores aos normalizados (4), (6).

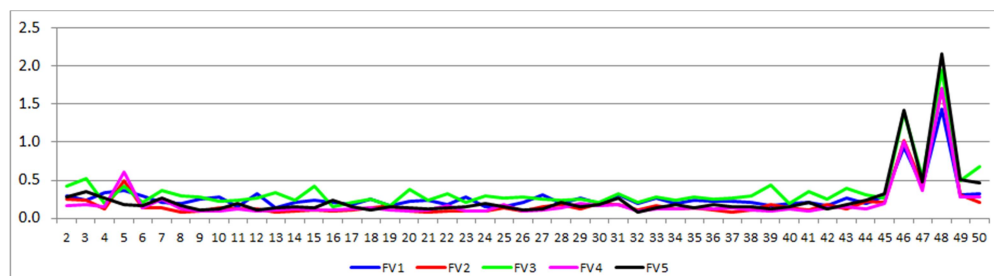


FIGURA 19 - Análise comparativa das distorções individuais das correntes entre cinco inversores de frequência.

Finalmente, se demonstra que durante a realização do monitoramento da QEE, foram também observadas variações intermitentes nas formas de onda e distorções, com oscilações periódicas, incluindo a presença de Inter harmônicos de altas frequências, superiores a 50ª ordem, ou seja, além dos componentes preponderantes, próximos a 2,88 kHz, foram detectadas componentes com frequências próximas a 6 kHz, sendo então classificados como supra harmônicos em sua faixa inicial (7),(8). Portanto, estes componentes estão diretamente relacionados com as frequências de chaveamentos dos inversores, sendo que em função do conjunto de diversos inversores, operando de forma independente e não sincronizada, tem-se uma modulação nas formas de onda das tensões equivalentes do sistema, em função das variações e da influência de componentes de altas frequências devido aos chaveamentos do tipo PWM. A Figura 20 mostra o espectro total das correntes, obtido em determinado instante da medição e o registro de componentes inter harmônicos de frequências elevadas.

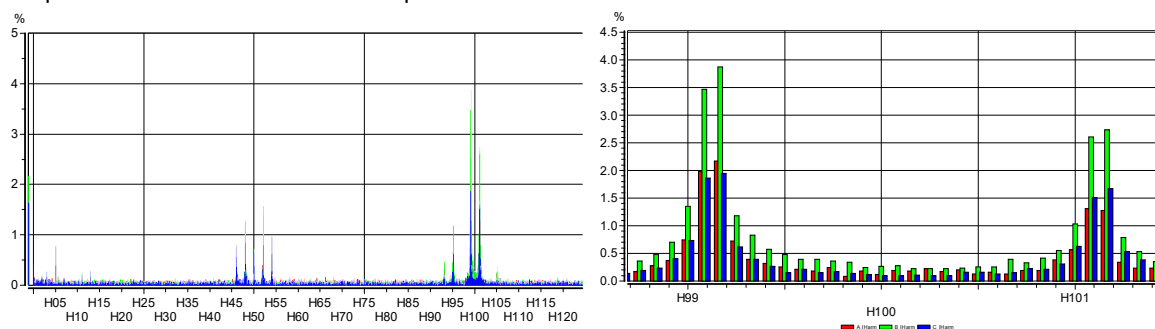


FIGURA 20 - Espectros harmônicos das correntes (*full spectra*) e detalhes dos inter harmônicos de altas frequências.

3.0 - CONCLUSÕES

Foram realizadas campanhas de medição das tensões no ponto de conexão com o sistema elétrico para as condições sem e com a operação do complexo de geração fotovoltaico, não sendo verificados impactos negativos ou quaisquer tipos de degradação da qualidade de energia. Portanto, o sistema se encontra plenamente apto a operação, estando em conformidades com os padrões e limites recomendados. Neste particular, durante as etapas das campanhas de medição, o sistema em análise não apresentava qualquer tipo de filtros de harmônicos no lado de média tensão ou alta tensão. Resultados adequados também foram consolidados internamente, seja em termos das tensões em 138, 34,5 ou 0,6 kV, com tensões plenamente adequadas.

Para as campanhas de medição das correntes dos inversores, foram avaliados diversos equipamentos, resultando em dados representativos a análise do sistema e injeção de harmônicos. Além dos harmônicos característicos, ressalta-se a forte presença de componentes de altas frequências (48ª e 46ª ordens) nas tensões do sistema e, principalmente, para as correntes de operação sob condições equivalentes de baixos carregamentos.

Análises semelhantes e demais verificações detalhadas quanto aos possíveis impactos das distorções devem ser conduzidas e investigadas, visando à caracterização e comparação do perfil harmônico das tensões e correntes, bem como dos indicadores de QEE em sistemas fotovoltaicos, destacando-se a influência de componentes harmônicos de altas frequências, inter harmônicos, além de variações cíclicas nas distorções e formas de onda, conforme observado durante o monitoramento deste sistema de geração com base na energia fotovoltaica.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Villalva, M.G.; Gazoli, J.R.; Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações - Sistemas Isolados e Conectados à Rede, 1ª Edição, Editora Érica, São Paulo, 2012.
- (2) Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) - Gerenciamento dos Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica da Rede Básica - Submódulo 2.8 - Revisão 2016.12 - Data de Vigência 01/01/17.
- (3) Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) - Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Acessos à Rede Básica ou nos Barramentos de Fronteira com a Rede Básica para Parques Eólicos, Solares, Consumidores Livres e Distribuidoras - ONS NT 009/2016 - Revisão 02, de março de 2018.
- (4) IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems - IEEE STD 519-2014, IEEE Power and Energy Society - March 27, 2014.
- (5) IEC 61400-21 - Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines.
- (6) IEC 61000-3-6 - Eletromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3: Limits, Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems.
- (7) Roger C. Dugan; Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty - Electrical Power Systems Quality, Mcgraw-Hill; Second edition; 2003.
- (8) Munoz, A.M.; Bollen, M.; Garrido, J.; Solar PV Inverter Supraharmonics Reduction With Random PWM; (<https://www.researchgate.net/publication/316612648>), 27/02/2018.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Nelson Clodoaldo de Jesus

Nasceu em Pindamonhangaba (SP) em 1970. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de Taubaté (UNITAU) em 1992 e grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 1995. Trabalhou como professor e pesquisador na Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ) e como Coordenador de Engenharia da AES Sul. Desde 2009, atua como sócio consultor na empresa GSI - Engenharia e Consultoria Ltda. É sócio fundador da Sociedade Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica (SBQEE). Possui mais de 150 artigos técnicos, publicados em revistas, conferências e congressos nacionais e internacionais. As principais áreas de interesse referem-se à Qualidade da Energia Elétrica, Sistemas Elétricos Industriais, Sistemas de Geração de Energias Renováveis e Transitórios Eletromagnéticos.



João Roberto Cogo

Nasceu em Dois Córregos (SP) em 1951. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 1974, grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 1977, Doutor em Engenharia Elétrica na Área de Automação pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) em 1987, e Pós-Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) em 1998. Trabalhou como Professor da EFEI e na Fundação Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL). É sócio fundador e Diretor da empresa GSI - Engenharia e Consultoria Ltda. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Automação Eletrônica de Potência, Sistemas Elétricos Industriais, atuando principalmente nos temas de Proteção, Estabilidade, Rejeição de Cargas, Transitórios Eletromagnéticos e Fluxo Harmônico.



Luiz Marlus Duarte

Nasceu em Taubaté (SP) em 1983. Possui graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica pela Universidade de Taubaté (UNITAU) em 2009. Atualmente trabalha como sócio consultor na empresa GSI - Engenharia e Consultoria Ltda. Áreas de interesse: Análise e Simulações de Sistemas Elétricos para Avaliação de Transitórios Eletromagnéticos, Curto-Circuito, Fluxo de Potência, Proteção e Seletividade.



Luis Fernando Ribeiro Ferreira

Nasceu em Jacutinga (MG) em 1991. Possui graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 2014. Foi bolsista pelo Programa Ciências sem Fronteiras na University of British Columbia (UBC). Atualmente trabalha como sócio consultor na empresa GSI - Engenharia e Consultoria Ltda, no desenvolvimento de estudos elétricos, com interesse nas áreas de Simulações de Estabilidade Eletromecânica e Transitórios Eletromagnéticos.



Éverson Júnior de Mendonça

Nasceu em Itajubá (MG) em 1995. Possui graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 2018, onde participou como aluno bolsista do Programa de Educação Tutorial de Engenharia Elétrica - PET. Atualmente trabalha na área de estudos elétricos na empresa GSI - Engenharia e Consultoria Ltda. Áreas de interesse: Estudos de Transitórios Eletromagnéticos, Qualidade de Energia, Proteção e Análise de Sistemas Elétricos.



Leandro Martins Fernandes

Nasceu em Pedralva (MG) em 1990. Possui graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 2019. Atualmente trabalha na área de estudos elétricos na empresa GSI - Engenharia e Consultoria Ltda. Áreas de interesse: Estudos de Sistemas Elétricos, Qualidade de Energia, Proteção e Transitórios Eletromagnéticos.



Jesus Daniel de Oliveira

Nasceu em Taubaté (SP) em 1996. Atualmente cursa a graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica pela Universidade de Taubaté (UNITAU) e trabalha na área de estudos elétricos na empresa GSI - Engenharia e Consultoria Ltda. As principais áreas de interesse referem-se a Estudos de Transitórios Eletromagnéticos, Qualidade de Energia e Energias Renováveis.