



## ESTUDO DE ACESSO DO CONJUNTO FOTOVOLTAICO JUAZEIRO SOLAR V A VIII CONECTADO À REDE IEEE 14 BARRAS

Natália Cornélia Silva Campos <sup>1</sup>, Yasmin Delbany Cury<sup>2</sup>

UFU – Universidade Federal de Uberlândia  
UFU – Universidade Federal de Uberlândia

**Resumo** - Nesse trabalho será apresentado um estudo de caso com objetivo de analisar as distorções harmônicas de tensão de Rede Básica, causadas pela instalação de um complexo de geração fotovoltaica. Através de simulações e a partir de um sistema de testes, IEEE 14 barras, definiu-se 3 casos de estudos, considerando o estado dos bancos de capacitores da rede. Todo o sistema de geração, redes e subestação elevadora foram modelados como fontes de correntes harmônicas injetadas nos pontos de conexão do empreendimento na Rede Básica. A modelagem da área de abrangência em que o sistema de geração se conecta e a análise das tensões harmônicas injetadas no ponto de acoplamento foram feitas por meio de softwares do CEPEL, Anarede e HarmZs, respectivamente. Os resultados obtidos nas simulações e medições são analisados entre si, e comparados com os limites de referência conforme a ONS. Para os casos simulados, o valor máximo de DHT foi de 9,66%. Foram aplicados filtros para 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> ordem harmônica, resultando num DHT final de 7,59%.

**Palavras-chave:** harmônicos, distorções harmônicas, geração fotovoltaica.

**Abstract** - In this work, a case study will be presented with the objective of analyzing the harmonic voltage distortions of the Basic Network, caused by a photovoltaic generation complex, through simulations and from a test system, IEEE 14 bars, 3 case studies were defined, considering the status of the two existent capacitor banks. The entire generation system, networks and booster substation were modeled as sources of harmonic currents injected at the connection points of the enterprise in the Basic Network. The modeling of the coverage area in which the generation system connects and the analysis of the harmonic voltages injected at the coupling point were made using CEPEL software, Anarede and HarmZs, respectively. The results obtained in the simulations and measurements are analyzed among themselves, and compared with the reference limits

according to ONS. For the simulated cases, the maximum value of DHT was 9,66%. Filters for 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> harmonic frequencies were included, and the final DHT result was 7,59%.

**Keywords:** harmonics, harmonic distortion, photovoltaic generation.

### I. INTRODUÇÃO

A adoção de energias alternativas tem sido amplamente buscada desde a década de 1970, quando as crises do petróleo levaram diversos países a procurar a segurança no fornecimento de energia e a redução da dependência da importação de combustíveis. Recentemente, as preocupações ambientais se tornaram o maior motor para a busca de alternativas mais limpas de produção de energia. Entre essas alternativas, a energia fotovoltaica é uma que despertou significativa atenção durante as últimas décadas. [1]. Sendo assim, estudos técnicos são importantes para conexão de um parque fotovoltaico, como a projeção da usina, solicitação de acesso. No âmbito da Qualidade de Energia Elétrica, distorções harmônicas possuem uma análise importante por parte do Operador Nacional do Sistema (ONS). Com o aumento dos sistemas de geração fotovoltaica e o avanço da tecnologia dos equipamentos que constituem esse sistema, a inserção de distorções harmônicas no sistema elétrico tornam-se frequentes. Com os estudos é possível é possível quantificar e analisar os possíveis impactos que podem ocorrer no sistema elétrico. Com uso de uma ferramenta computacional adequada é possível analisar diversas situações em que o sistema pode operar. Dessa forma, depreende-se que os estudos de comportamento harmônico, como os necessários para conexão de novos empreendimentos à Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN), utilizam diversos cenários considerando vários anos futuros, níveis de carregamento e contingências para avaliação das redes. Estes cenários geram uma enorme quantidade de resultados que devem ser processados e apresentados na forma de gráficos e tabelas para que possam ser analisados e, por fim, submetidos

ao Operador Nacional do Sistema (ONS) [2]. O objetivo geral do trabalho consiste em modelar e simular a compensação de correntes harmônicas, encontrando a Distorção Harmônica Total (DHT) que circulam na rede elétrica por meio de inversores, banco de capacitores, modelando o sistema elétrico em que um Complexo Fotovoltaico partir de um sistema de testes, IEEE 14 barras, validando os modelos numéricos aplicados por meio de medições reais executadas no empreendimento. O foco do estudo estará nas distorções harmônicas presentes nas ondas de tensão, comparando os resultados com os respectivos limites desses indicadores estipulados pela ONS.

Dessa forma, é possível demonstrar as modelagens das distorções harmônicas de tensão de Rede Básica, causadas por um complexo de geração fotovoltaica, através de simulações e a partir de um sistema de testes, IEEE 14 barras. Além disso, analisar quatro casos diferentes em relação a distorção harmônica total. O primeiro caso com ambos os bancos de capacitores (A e B) ligados; o segundo caso com o capacitor A ligado e o capacitor B desligado, o terceiro caso com o capacitor B ligado e o capacitor A desligado e o quarto caso com ambos os capacitores desligados. Por fim, apresentar e analisar inserção dos filtros, sendo foi feita uma nova simulação para o quarto caso a fim de obter novos resultados de DHT.

## I. METODOLOGIA

A pesquisa será caracterizada pelos seus fins descritivo e quantitativa, calculando diferentes variantes da distorção harmônica total. O primeiro caso com ambos os bancos de capacitores (A e B) ligados; o segundo caso com o capacitor A ligado e o capacitor B desligado e o terceiro caso com ambos os bancos desligados.

Os estudos de avaliação quanto à distorção harmônica no PAC têm como referência as diretrizes indicadas nos procedimentos de Rede [ONS,2020] e nas instruções específicas publicadas pelo ONS, na NT 009/2016, Rev.02, datada de março de 2018 [ONS, 2016] Dessa maneira, a análise do desempenho harmônico permite avaliar os impactos de qualquer característica não linear (parques eólicos, SVC, usinas fotovoltaicas, entre outros) no PAC. Para tanto, avalia-se os impactos na qualidade da energia elétrica (QEE) sobre a transmissão (Rede Básica e DITs), mediante análise de distorções harmônicas de tensão, quando da operação do parque eólico em regime de operação permanente, e em contingências simples não simultâneas utilizando o critério (N-1), considerando até a terceira vizinhança. Assim, faz-se o uso destes valores de impedâncias, nas diferentes ordens harmônicas (até a 50ª harmônica).

## II. SOFTWARES

Para o estudo do impacto harmônico de novas conexões, possui uma série de métodos, ferramentas e facilidades necessárias para atender plenamente as necessidades dos agentes, destacando-se a leitura da base de dados dos programas ANAREDE [3] (fluxo de potência) e ANATEM [3] (estabilidade eletromecânica), a linguagem "batch" [3], o processamento em modo TURBO [4], os métodos para

seleção automática de contingências [4] e as interfaces gráficas de traçados de Lugares Geométricos (LGs) de admitâncias [3], na forma de setores circulares e polígonos de "n" lados. Todas estas funcionalidades encontram-se completamente integradas, tornando a execução desses estudos uma tarefa bem menos custosa.

Além dos estudos de acesso, o HarmZs também pode ser utilizado para realizar a análise modal de redes elétricas. Esta análise propicia a obtenção de um conjunto de informações estruturais sobre o sistema que é difícil de ser obtido por outros métodos convencionais como a simulação no tempo ou resposta em frequência. Estas informações compreendem os polos, zeros e as sensibilidades destes polos e zeros em relação aos elementos do sistema. Estas sensibilidades podem ser efetivamente utilizadas em soluções não convencionais de mitigação de distorções harmônicas de tensão, indicando quais elementos e quais alterações nos valores de seus parâmetros devem ser realizadas [5], [5].

O objetivo deste trabalho é apresentar um conjunto de ferramentas e métodos que foram desenvolvidos no programa HarmZs para auxiliar a execução de estudos de comportamento harmônico e ajudar na tomada de decisões para mitigação de distorções harmônicas.

A leitura dos arquivos de entrada dos programas ANAREDE e ANATEM, cuja interface gráfica é apresentada na Figura 1, objetiva o aproveitamento de dados de componentes de rede como elementos "shunts", linhas de transmissão, transformadores, cargas e máquinas do sistema (resistências de armadura e reatâncias subtransitórias). Diversas funcionalidades para tornar estes dados compatíveis com os estudos de comportamento harmônico estão disponíveis nesta interface [5].

## VI. SISTEMA MODELADO

### VI.1 REDE INTERNA

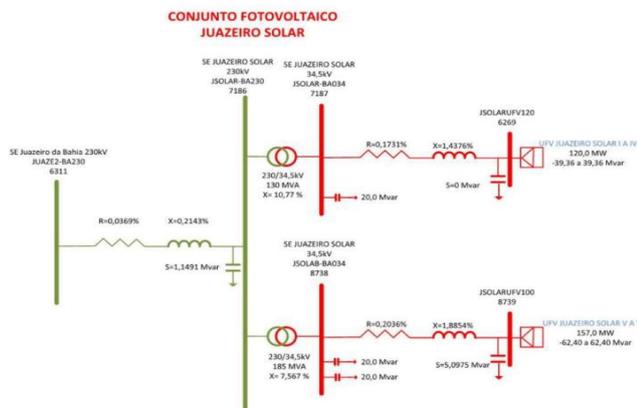
A usina solar fotovoltaica escolhida para realização do estudo de acesso foi a de Juazeiro Solar (V a VIII). Ela conta com 157MW de potência instalada e foi acoplada a um empreendimento de mesmo nome já existente (I a IV). O local de instalação é no município de Juazeiro no estado da Bahia, e a conexão à rede básica é feita no setor de 230kV da SE Juazeiro da Bahia II. A tensão nominal do transformador que compõe a rede é de 230/34,5kV.

Serão utilizados 140 inversores de 1,1MW para o estudo, do modelo Ingeteam / Ingecon SUN 1690 TL B650. A divisão será feita igualmente para os conjuntos V a VIII, com 35 inversores para cada. Será considerado que haverá uma divisão igualitária de potência instalada dos módulos fotovoltaicos para os 4 conjuntos.

O transformador 230/34,5kV será chamado de TR01. Ele possui 3 enrolamentos, sendo o primário com 230kV, o secundário com 34,5kV e o terciário com 13,8kV. Sua potência nominal é 120/150/185 MVA. Possui o primário e secundário ligados em estrela aterrada (YN) e o terciário ligado em delta. Possui parâmetros semelhantes para impedância de sequência positiva, negativa e zero, sendo seu  $X\% = 7,567\%$ . Dessa forma, O diagrama unifilar desta rede

(que será chamada de rede interna) pode ser observado na figura 1:

Figura 1: Esquema do diagrama unifilar para integração da UFV Juazeiro Solar V a VIII.

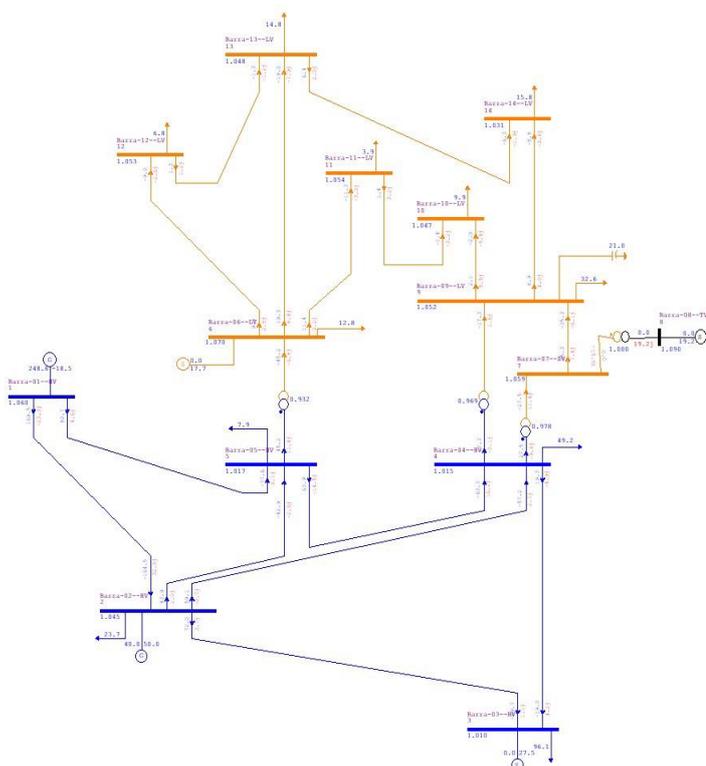


Foram adicionados os dois conjuntos de bancos de capacitores presentes na Figura 1, o banco A de 20MVAR e o banco B de 20MVAR.

### VI.II. REDE EXTERNA

A rede externa à qual será conectada a usina fotovoltaica será uma rede chamada de IEEE 14 Barras, uma rede padrão fornecida pela IEEE a fins de estudos acadêmicos. O diagrama desta rede foi aberto no software ANAREDE, e pode ser observado na Figura 02:

Figura 02: Esquema do diagrama unifilar da rede IEEE 14 Barras.



A barra da rede externa à qual será conectada a usina fotovoltaica é a barra 3. Para fins de estudo, será considerado que esta barra é de 69kV e que o sistema fotovoltaico é de 69/34,5kV.

Os inversores utilizados têm potência nominal de 1,1MW e tensão nominal de 500V. Assim, foi considerado que existirão 4 transformadores de 34,5kV/500V na entrada de cada um dos conjuntos fotovoltaicos. Foi considerado um valor padrão de resistência  $R = 1\%$  e reatância  $X = 5\%$  para cada um deles.

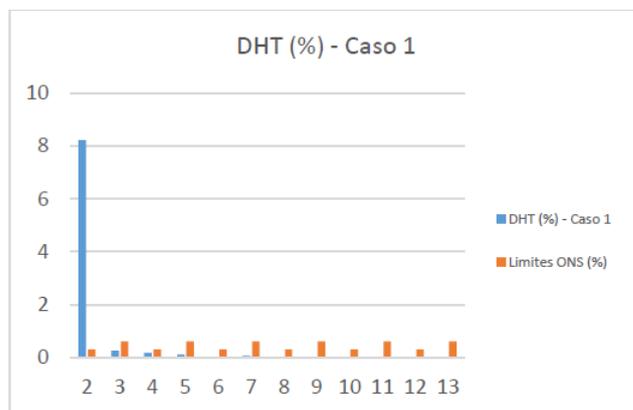
### VII. RESULTADOS

Foram montadas as duas redes no Harmz, também com auxílio do software EditCepel. Para as correntes harmônicas a serem inseridas pelos inversores, foram utilizadas as correntes certificadas recebidas pelo fornecedor dos equipamentos.

Foram analisados três casos diferentes: o primeiro caso com ambos os bancos de capacitores (A e B) ligados. O segundo caso com o capacitor A ligado e o capacitor B desligado; o terceiro caso com ambos os capacitores desligados. O principal objetivo deste estudo é observar a Distorção Harmônica Total no ponto de acoplamento do conjunto fotovoltaico.

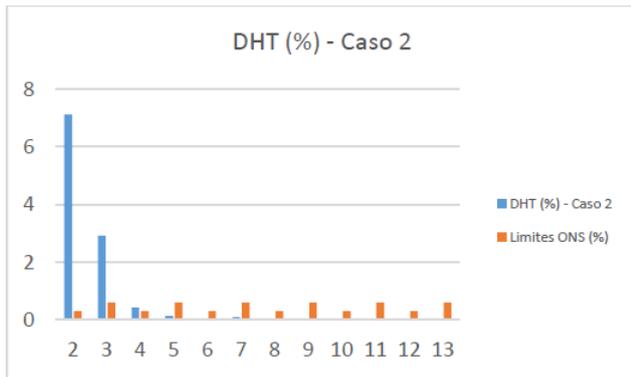
No primeiro caso, os dois capacitores foram mantidos conectados ao sistema. Pelo método do lugar geométrico, o Harmz obteve os seguintes resultados observados na Figura 03. O DHT total pelo método do lugar geométrico do caso 1 foi de  $DHT_1 = 8,06778\%$ . Para fins de visualização, os gráficos foram plotados apenas até a 13ª ordem harmônica, visto que as próximas ordens não apresentaram violações significativas dos limites do ONS.

Figura 3: DHT(%) vs Limites do ONS para ambos os capacitores ligados.



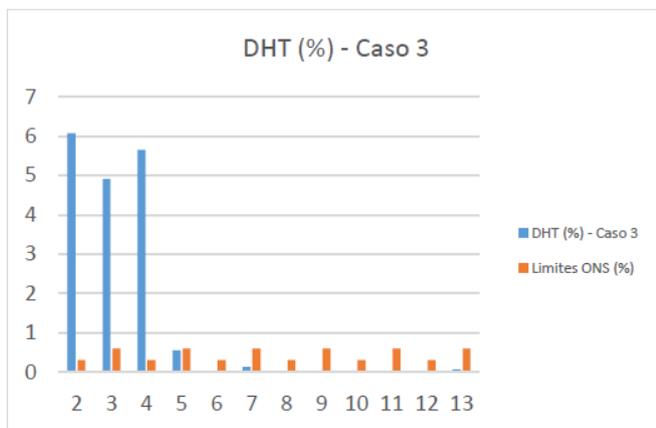
No segundo caso, o capacitor A foi mantido conectado ao sistema e o capacitor B foi desligado. Pelo método do lugar geométrico, o Harmz obteve os seguintes resultados, conforme observado na Figura 04, o DHT total pelo método do lugar geométrico do caso 2 foi de  $DHT_2 = 7,694\%$ .

Figura 4: DHT(%) vs Limites do ONS para Capacitor A conectado e B desconectado.



No terceiro, ambos os capacitores foram desligados do sistema. Pelo método do lugar geométrico, o Harmz obteve os seguintes resultados. Observa-se que o DHT total pelo método do lugar geométrico do caso 2 foi de  $DHT_3 = 9,66198\%$ .

Figura 5: DHT(%) vs Limites do ONS para ambos os capacitores desligados.



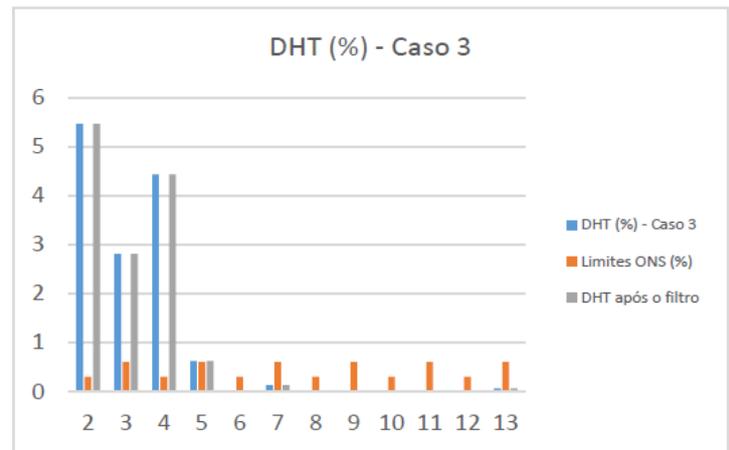
Além disso, se observou que o maior índice de DHT ocorreu no segundo caso, conforme a Tabela 01 em que os maiores módulos de correntes harmônicas ocorreram na segunda, terceira e quarta ordem (120Hz, 180Hz e 240Hz, respectivamente). Assim, foi projetado um filtro para cada uma destas frequências. Os filtros calculados possuem as seguintes características:

Tabela I – Parâmetros calculados para os filtros

Frequência [Hz]	Resistência [pu]	Reatância [pu]	Susceptância [pu]
120	1,09649123	69,25208	0,004
180	0,71839	29,72652	0,004
240	0,53419	16,43655	0,004

Com isso, após a inserção dos filtros, foi feita uma nova simulação para o terceiro caso a fim de obter novos resultados de DHT. Estes resultados podem ser observados na Figura 07, conclui-se que com os filtros, houve uma diminuição no valor de DHT para 7,595%.

Figura 7: Repetição do caso 3 após a inserção do filtro.



## VIII. CONCLUSÃO

Após o levantamento teórico e quantitativo que embasa este trabalho, é possível avaliar a distorção harmônica no complexo Juazeiro Solar (V a VIII). Ela conta com 157MW de potência instalada e foi acoplada a um empreendimento de mesmo nome já existente (I a IV). O local de instalação é no município de Juazeiro no estado da Bahia, e a conexão à rede básica é feita no setor de 230kV da SE Juazeiro da Bahia II. A tensão nominal do transformador que compõe a rede é de 230/34,5kV. Após análise, se observou que o maior índice de DHT ocorreu no terceiro caso, conforme a Tabela 01 em que os maiores módulos de correntes harmônicas ocorreram na segunda, terceira e quarta ordem harmônica (120Hz, 180Hz e 240Hz, respectivamente). Assim, foi projetado um filtro para cada uma destas frequências. Com isso, através de análises notou-se a proximidade dos resultados obtidos nos métodos e abordagens utilizadas para quantificar as distorções harmônicas na conexão de uma usina de geração fotovoltaica. Neste estudo, foram utilizadas correntes harmônicas certificadas fornecidas pelo fabricante dos inversores. Com isso, os resultados podem ter sido influenciados por esses valores medidos em condições ideais. Para resultados mais assertivos e reais, em estudos futuros, será feita uma medição em campo destas correntes.

## IX REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRASIL. Plano decenal de expansão de energia 2019. Brasília, DF: MME/EPE, 2010.
- [2] Operador Nacional do Sistema (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 – Rev. 3”, julho de 2020.
- [3] CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Manual de Utilização do Programa HarmZs - Versão 3.0”, CEPEL, Rio de Janeiro, 2016.
- [4] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley e S. Umans, Máquinas Elétricas, 6ª ed., São Paulo: Bookman, 2008. CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Manual de Utilização do Programa HarmZs - Versão 3.0”, CEPEL, Rio de Janeiro, 2016.

[5] Sergio Luis Varricchio and Sergio Gomes Jr., “Electrical Network Dynamic Models with Application to Modal Analysis of Harmonics”, *Electric Power Systems Research*, v. 154, p. 433-443, 2018.