

Análise harmônica de um reator a núcleo saturado no âmbito de requisitos de acesso utilizando o sistema 14 barras do IEEE

Ítalo Leonardo Faria Ferreira
Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
<https://orcid.org/0009-0000-5399-0851>

Guilherme Daher da Cunha Oliveira
Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
guilherme.daher@ufu.br

Ivan Nunes Santos
Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
<https://orcid.org/0000-0001-8630-1354>

Resumo— Este artigo investiga o efeito de um reator a núcleo saturado, usado para mitigação de sobretensões, sobre os níveis de distorções harmônicas em um sistema elétrico de potência. Utilizando o sistema teste de 14 barras do IEEE, a pesquisa quantifica a contribuição harmônica do reator, verifica a conformidade com os limites do ONS (Operador Nacional do Sistema) e propõe soluções para eventuais não conformidades. O estudo concentra-se no comportamento harmônico do reator e sua influência nos requisitos nacionais de conexão à rede de cargas com características não lineares.

Palavras-chave: qualidade de energia, reator a núcleo saturado, harmônicos, requisitos de acesso e sobretensões.

I. INTRODUÇÃO

O crescente aumento da geração distribuída no Brasil tem levado ao aumento da tensão elétrica em alguns locais, devido à produção de energia excedente em relação à demanda instantânea, bem como, devido à característica resistiva da rede de distribuição e transmissão [1]. Fator este, que é agravado devido à extensão das redes de transmissão de energia no país, que acaba gerando o chamado efeito Ferranti que é o aumento de tensão no receptor da Linha de Transmissão e está associado às linhas de distâncias longas e na situação em que a carga é baixa [2].

Diante dos desafios citados, para reduzir essa elevação dos níveis de tensão no sistema elétrico, pode ser adotado alguns dispositivos de mitigação, dentre eles, pode-se citar o reator a núcleo saturado (RNS). Este equipamento possui um cunho totalmente eletromagnético e que dispensa qualquer meio de medição, tomadas de decisão e de controle. Opera considerando apenas as suas características elétricas intrínsecas [3].

O reator a núcleo saturado (RNS) pode ser amplamente utilizado em redes de transmissão e distribuição de energia devido sua praticidade e confiabilidade, no entanto, sua aplicação deve ser cuidadosamente analisada devido ao potencial que este dispositivo tem para produção de distorções harmônicas de corrente e, consequentemente, tensão. Por possuir um comportamento não-linear, o seu funcionamento produz correntes harmônicas no sistema e, com isso, pode-se infringir os parâmetros estabelecidos nos requisitos de acesso para os agentes de geração de energia elétrica e de cargas com características não lineares, conforme iremos analisar na sequência através da Nota Técnica 009/2016 Rev.3 (2019) do Operador Nacional do Sistema Elétrico.

II. REATOR A NÚCLEO SATURADO

O princípio de funcionamento do RNS é bastante peculiar, pois tem por fundamento a curva característica de operação ($V \times I$), a qual é diretamente relacionada com o tipo de material magnético utilizado no núcleo e também com o tipo de conexão de seus enrolamentos. Isto confere ao equipamento um comportamento de impedância variável de acordo com o nível de tensão do barramento ao qual ele encontra-se inserido. Assim sendo, sob tensões inferiores a um valor pré-definido em projeto, o dispositivo eletromagnético opera numa região de menor saturação, demandando assim, uma pequena potência reativa do sistema. Todavia, em momentos de sobretensão a ação do equipamento é um tanto quanto distinta desta primeira situação.

Por possuir um comportamento não linear, a corrente elétrica no RNS varia conforme a tensão da rede, como ilustrado na Fig. 1. Em situações de operação em tensão nominal ou em casos de afundamento de tensão, o RNS irá operar na região linear ou não saturada, absorvendo então pouca potência reativa da rede elétrica. Já em momentos de sobretensão, ele entra em saturação, absorvendo então uma grande quantidade de potência reativa do sistema e reduzindo automaticamente a tensão da barra para níveis aceitáveis.

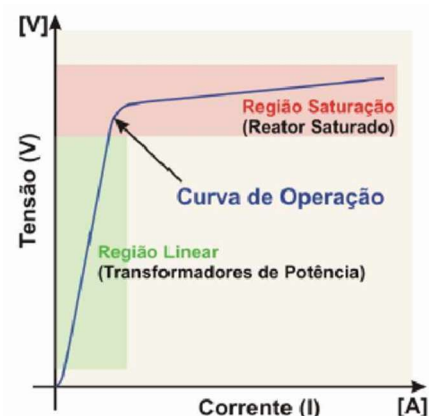


Fig. 1 - Relação tensão versus corrente no RNS.

Desta forma, a operação do RNS, assim como sua capacidade na compensação de reativos, será influenciada pela tensão do barramento em que ele se encontra conectado. Além disso, a regulação da tensão proporcionada pelo reator será regida pela não-linearidade da curva ($B \times H$) do material magnético empregado na construção de seu núcleo.

Atualmente, existem dois arranjos elétricos de RNS designados como: Twin-Tripler (seis colunas magnéticas) e Treble-Tripler (nove colunas magnéticas) [4]. No presente estudo será adotado o primeiro modelo citado, dada a sua maior simplicidade construtiva.

O regulador Twin-Tripler, ou reator saturado de 12 pulsos, consiste em um equipamento formado por dois núcleos magnéticos trifásicos idênticos, contendo 3 colunas magnéticas cada núcleo, sobre os quais são montados dois enrolamentos concêntricos por coluna interconectados em série. Este arranjo é formado de modo similar a dois transformadores de três colunas em que os enrolamentos de cada fase estão interligados em série, na formação ziguezague e estrela com neutro flutuante, conforme mostra a Fig. 2.

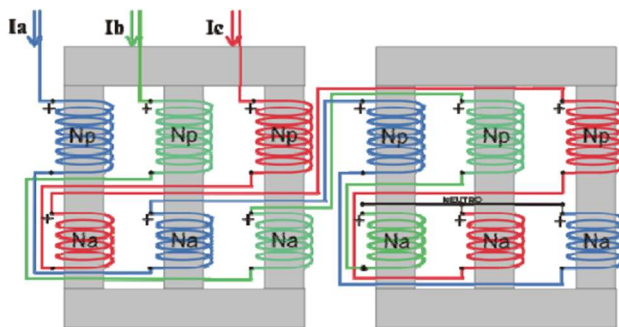


Fig. 2. Arranjo construtivo do RNS twin-tripler.

O reator Twin-Tripler é um equipamento não linear e, conseqüentemente, potencial gerador de distorções harmônicas, ou seja, apesar deste equipamento ser adotado para a mitigação de um problema de qualidade da energia elétrica (sobretensões), ele pode gerar como efeito colateral outro distúrbio (harmônicos). Então, como a própria nomenclatura “12 pulsos” sugere e considerando as condições ideais de alimentação e operação, os reatores do tipo Twin-Tripler passam a produzir harmônicas característicos de ordem $h = 12k \pm 1$, sendo k um número inteiro igual ou maior que um [6].

Já o fator determinante que proporciona o cancelamento das harmônicas de ordem inferior é a relação entre o número de espiras dos enrolamentos auxiliar e principal. Sendo essa igual a 0,366, assegurando um conjunto de seis ondas de forças magnetomotrizes deslocadas entre si de 30° .

O RNS adotado para análise no presente artigo científico é um dispositivo do tipo Twin-tripler de 515kVAr, tensão de 34,5kV trifásico, cuja modelagem das características eletromecânicas foram realizadas no software Matlab, considerando os seguintes dados de saturação apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados de saturação do RNS

	Primário	Secundário
U (V)	9631,7	3524,2
R (ohm)	0,89268	0,12145
L (ohm)	0,08180	0,01096

Já as características da curva correntes x fluxo magnético do RNS são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados da curva corrente x fluxo magnético

I (A)	Fluxo (Wb/T)
0,002995	2,483
0,0049918	4,9659
0,0079868	9,9318
0,010722	14,898
0,014194	17,381
0,028909	19,864
0,06142	21,105
0,42655	22,968
3,3425	24,83

III. CORRENTES CERTIFICADAS DO RNS

Diante do pressuposto e visto que em cada nível de tensão há uma determinada corrente fluindo pelo equipamento, o primeiro passo da análise do comportamento do RNS no sistema proposto, foi levantar as correntes elétricas em razão da tensão para se obter, as chamadas correntes certificadas do equipamento. Posteriormente, estas correntes são inseridas no software HarmZs, conforme preconizado na Nota Técnica 009/2016 Rev.3 (2019) e, assim, torna-se possível a realização da análise harmônica preditiva da conexão de um RNS no sistema elétrico da rede de operação sob responsabilidade do ONS.

O processo de levantamento das correntes certificadas de um RNS ainda não é descrito por nenhuma normativa e, por isso, baseamos inicialmente na norma “IEC 61400-21-1-2019 - Wind energy generation systems – Part 21-1: Measurement and assessment of electrical characteristics – Wind turbines” [5].

Através desta norma, é apresentado em seu item 8.2.4 – Harmônicos, Inter-harmônicos e Componentes de Alta Frequência, que cada componente de corrente harmônica individual pode ser especificada através de subgrupos da frequência até a 50ª ordem da frequência fundamental da rede.

Os valores de cada ordem de corrente harmônica individual e de distorção total da corrente harmônica podem ser obtidos através da média da corrente nominal (I_n) e a média das correntes harmônicas (I_h) do dispositivo – no caso da IEC esse equipamento é o Gerador Eólico – após a operação por 10 minutos com potência nominal de 0, 10, 20, ..., 100%. Após a coleta dos dados aplica-se a Equação 1 para obter a corrente harmônica total.

$$THC = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_n} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

THC Corrente harmônica total;
 h Ordem harmônica;
 I_h Corrente da ordem harmônica h ;
 I_n Corrente nominal.

No caso do Gerador Eólico, a variação da corrente nominal (I_n) necessária para se calcular o THC, depende da intensidade

do vento que incide sobre as pás para variar a potência nominal gerada de 0, 10, 20, ... , 100% e assim obter as correntes certificadas. Já na situação do RNS, a variação da corrente nominal (I_n) necessária para se calcular o THC, depende da tensão nominal da rede que o RNS está conectado, mas como a curva de tensão versus corrente do RNS é do tipo não-linear, ver Fig. 1, foi adotado como variável a potência que ele absorve da rede e assim coletado as medições conforme os respectivos níveis de potência absorvida em frações de 0, 10, 20, ... , 100%.

Já em relação à aplicação dessa metodologia no RNS, utilizou-se de uma modelagem computacional na plataforma do Simulink do software do Matlab. Na modelagem, ver Fig. 3, foi inserido os seguintes componentes: Uma fonte (1) senoidal de 69kV representando a rede básica, conectada a uma barra (2) que representa o ponto de acoplamento comum (PAC) entre a rede interna e a rede básica, um transformador (3) de 69kV para 34,5kV para rebaixar a tensão ao nível de operação do RNS (4) de 515kVAr, bem como alguns outros componentes para medição e coleta de dados do sistema.

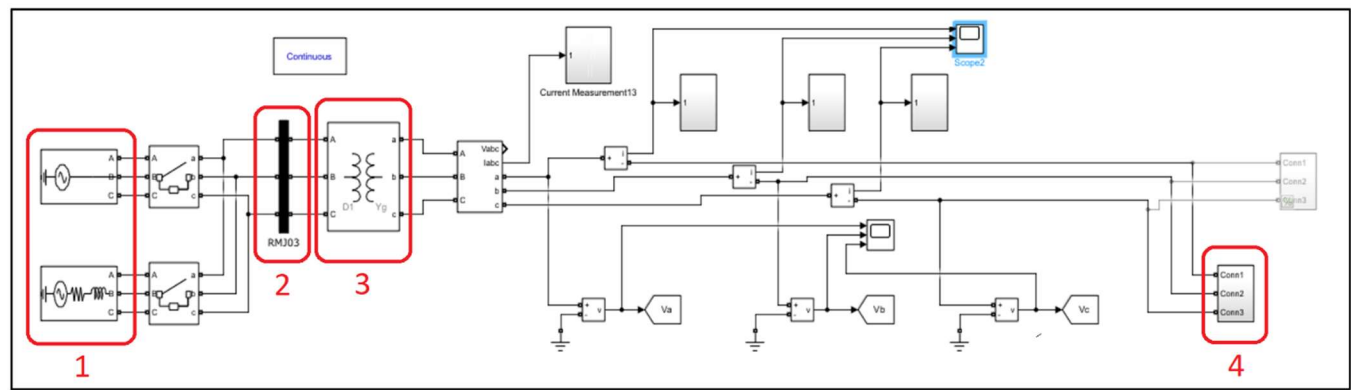


Fig. 3. Esquemático do sistema elétrico adotado no Matlab para levantamento das correntes certificadas do RNS.

Após realização da modelagem computacional do RNS e do sistema em que ele está inserido, é configurada a fonte para a tensão de 63,4kV e analisado o seu comportamento em 10% da potência nominal, ou seja, 63,4 kVA. O resultado da corrente nominal e das correntes harmônicas até a 50ª ordem da frequência fundamental (60Hz) foram anotados em amperes e em porcentagens em relação à fundamental, conforme é apresentado na Tabela 3. O mesmo procedimento é novamente realizado aumentando a tensão, de modo que a potência aumente em frações de 10% até chegar à potência nominal (100%) do RNS, ou seja, 515kVAR na tensão de 75kV.

Tabela 3 - Correntes levantadas do RNS

Pbin (%)	10% de Q = 515QVAR		20% de Q = 515QVAR			100% de Q = 515QVAR	
	V usada	Q	V usada	Q		V usada	Q
	63,4 kV	63,4 kVA	65,3 kV	105		75kV	515
	Q (%)	10%	Q (%)	20%		Q (%)	103%
h	Harm.	%	Harm.	%		Harm.	%
1	1,03	100,00%	1,66	100,00%		7,51	100,00%
2	0	0,00%	0	0,00%		0	0,00%
10	0	0,00%	0	0,00%	...	0	0,00%
11	0,21	20,39%	0,27	16,27%		0,94	12,52%
13	0,05	4,85%	0,01	0,60%		0,21	2,80%
23	0,05	4,85%	0,07	4,22%		0,26	3,46%
25	0	0,00%	0,02	1,20%		0,14	1,86%
35	0,02	1,94%	0,04	2,41%		0,1	1,33%
37	0	0,00%	0,01	0,60%		0,07	0,93%
47	0,01	0,97%	0,02	1,20%		0,03	0,40%
49	0	0,00%	0,01	0,60%		0,03	0,40%
DHT(v)	DHT (i)	21,62%	DHT (i)	17,09%		DHT (i)	13,52%

Realizado o levantamento de todas as correntes harmônicas, conforme apresentado acima, a última etapa consiste em selecionar a maior corrente harmônica para cada ordem harmônica e agrupá-las, conforme mostrado na Tabela 4, finalizando assim o levantamento das correntes harmônicas do RNS em estudo.

Tabela 4 - Correntes certificadas do RNS

h	Máx. Correntes	
	Harm. (A)	%
1	7,51 A	100,00%
2	0,01 A	0,13%
10	0,02 A	0,27%
11	0,94 A	12,52%
13	0,21 A	2,80%
23	0,26 A	3,46%
25	0,14 A	1,86%
35	0,10 A	1,33%
37	0,07 A	0,93%
47	0,04 A	0,53%
49	0,03 A	0,40%

Obtendo as correntes certificadas do RNS, pode-se observar uma característica típica do arranjo do tipo Twin-Tripler que foi apresentado nos estudos de [6], onde diz que no momento de operação em sistemas equilibrados, produz correntes trifásicas com conteúdo espectral representado pela clássica expressão:

$$h = 12k \pm 1 \tag{2}$$

Sendo “h” a ordem harmônica de corrente gerada pelo dispositivo e k um número inteiro positivo, a expressão mostra que apenas harmônicos ímpares, a exemplo das ordens 11, 13, 17, 19, etc., são produzidos pelo equipamento quando ele opera dentro de condições ideais de funcionamento e em sistemas equilibrados.

Vale destacar que o funcionamento do RNS do tipo Twin-Tripler em sistemas desequilibrados gera uma distribuição de correntes nas fases do sistema de forma irregular, o que pode gerar harmônicas de ordens distintas das ordens comentadas anteriormente.

IV. APLICAÇÃO DO RNS NO SISTEMA 14 BARRAS DO IEEE

Na análise do comportamento do RNS no âmbito de requisitos de acesso, optou-se pela utilização do sistema 14 barras do IEEE por ser modelo de rede elétrica amplamente utilizado em estudos de engenharia elétrica, especialmente em análises de fluxo de carga, estabilidade, otimização de sistemas de energia elétrica e devido ao seu esquemático ser composto apenas de componentes lineares, ou seja, não possui correntes harmônicas no sistema inicial, logo, todas as correntes harmônicas que surgirem são originárias do RNS.

O sistema 14 barras do IEEE foi desenvolvido pelo Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE) e é uma representação simplificada de um sistema de transmissão de energia [10]. Vale ressaltar que devido à ampla difusão deste sistema na literatura técnica e às limitações de espaço deste artigo, a sua descrição detalhada será aqui omitida.

Para realizar a simulação do sistema 14 barras com a aplicação do RNS, foi utilizado o programa ANAREDE que é um software desenvolvido pelo CEPEL para a análise de fluxo de potência em regime permanente. Através dele, podemos observar qual é o fluxo de potência das linhas, qual a tensão das barras e dentre outras dados.

Na análise do sistema 14 barras, observou-se que a barra número 06 apresentava a tensão de 1,07 pu, sendo, esta, a maior tensão nominal deste sistema e, nestas condições, infringindo os limites estabelecidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [7] que estabelece a tensão máxima de 1,05 pu, ver Fig. 4, e devido à essa razão essa foi a barra escolhida para simular a instalação do RNS.

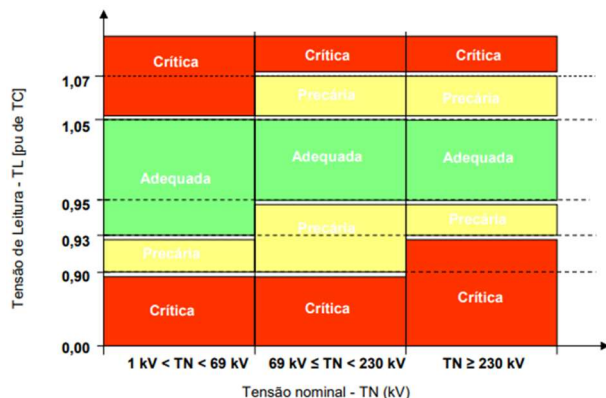


Fig. 4. Limites de tensão estabelecidos pelo ONS.

Simulando a inserção do RNS na barra 06, através de uma carga shunt puramente indutiva no software, a potência foi definida de maneira empírica até a tensão da barra rebaixar de 1,07 pu para o nível de tensão de 1,03 pu, ver Fig. 5 e Fig. 6, o que não é exatamente a tensão nominal (1,0 pu) e também não é a tensão limite estabelecido pelo ONS (1,05 pu), mas é um nível de tensão intermediária e é mais usual por não necessitar de um RNS de grande potência, o que impactaria em um grande custo financeiro, além de gerar mais correntes harmônicas no sistema.

Fig. 5. Dados do RNS implementado no arranjo de 14 Barras do IEEE no software ANAREDE.

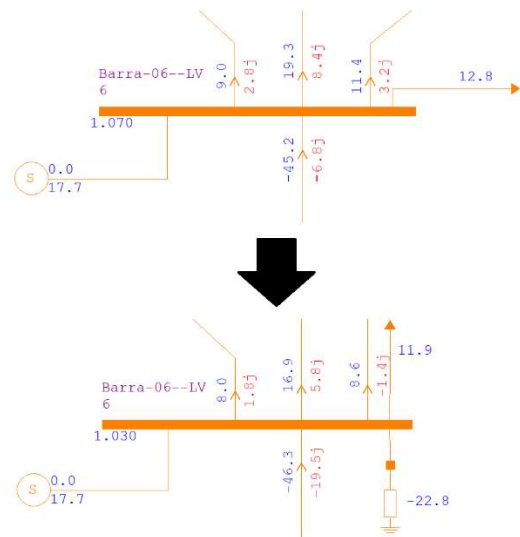


Fig. 6. Inserção do RNS na barra 6 do sistema 14 barras do IEEE.

A potência definida para implementar o RNS na barra 06 do sistema de 14 barras do IEEE foi de 21,5 MVAR e através dela, foi calculada a corrente nominal do RNS e utilizando ela como referência e com base nos percentuais das correntes harmônicas certificadas, foram calculadas as correntes harmônicas até a 50ª ordem da frequência fundamental. Estes valores foram convertidos em P.U. e assim finalizado o levantamento das correntes certificadas necessárias para realizar a análise harmônica no próximo software.

V. ANÁLISE HARMÔNICA DO RNS NO HARMZS

Para realizar a análise harmônica do RNS no sistema elétrico de 14 barras do IEEE foi utilizado o Harmzs que é um software desenvolvido pelo CEPEL que permite modelar as distorções harmônicas geradas pelo RNS em um sistema elétrico, levando em consideração os limites toleráveis.

Essa análise harmônica é crucial para garantir que o sistema do agente acessante não cause distorções excessivas que inflja nos limites pré-estabelecidos pelo ONS e possa impactar na operação de outros dispositivos conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN), garantindo a estabilidade, a eficiência e a qualidade da energia.

Para isso, após a análise no ANAREDE simulando a inserção do RNS e definir a barra 06 como o Ponto de Acoplamento Comum (PAC), o software Harmzs realiza a seleção automática das contingências até a terceira vizinhança a partir do PAC. As contingências são operações na rede como a saída de linha de transmissão, transformador e entre outras. Essas contingências são incorporadas a um arquivo chamado

“Batch”, sendo esse processo de automatização do software crucial para lidar com o grande volume de informações, reduzindo significativamente o tempo e o esforço necessários para completar o estudo [8].

Após o processamento, um arquivo de extensão “.PRX” é criado, contendo todas as impedâncias harmônicas de todos os casos base e suas contingências, nas frequências harmônicas de interesse, 2º ao 50º harmônico, com passo de 6 Hz. Este arquivo “.PRX” é então utilizado para alimentar as interfaces gráficas de traçado dos Lugares Geométricos (LGs) de admitâncias, permitindo a visualização das distorções harmônicas de tensão individuais e totais[8].

Os limites toleráveis de distorções harmônicas de tensão individuais (DTHI) e totais (DTHTS95%) no âmbito dos requisitos de acesso à rede básica, é estabelecido pelo ONS nos Procedimento de rede através do Submódulo 2.9 - Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Limites individuais para os indicadores DTHI e totais DTHTS95% [9].

V ≥ 69 kV			
DTHI, h ímpar		DTHI, h par	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3 a 25	0,6%		
		todos	0,3%
≥27	0,4%		
DTHTS95% = 1,5%			

Após todo o processo, são obtidos os indicadores DTHI e totais DTHTS95% do sistema e analisado os resultados conforme os limites toleráveis estabelecidos anteriormente, na Tabela 6 é apresentado esses valores, sendo os parâmetros infringentes aos limites, demarcados na cor vermelha.

Tabela 6 - Resultados da DTHI e totais DTHTS95% no PAC

DTHTS95% =		2,4745
h	Freq(Hz)	DTHI Máx(%)
2	120	0,0086
10	600	0,0402
11	660	2,0779
13	780	0,5496
23	1380	0,9330
25	1500	0,5135
35	2100	0,4436
37	2220	0,3188
47	2820	0,2086
49	2940	0,1615

Além dos resultados de distorção harmônica individuais e totais, é obtido também os gráficos de traçado dos Lugares Geométricos (LGs) do tipo polígono de “N” lados nas frequências múltiplas de 60Hz até a 50ª ordem, sendo estes gráficos inseridos nos relatórios, que são apresentados à concessionária, comprovando que o empreendimento atenda aos requisitos de qualidade de energia exigidos pelo Operador Nacional do Sistema e permita que o sistema entre em operação sem causar impactos adversos no SIN.

É apresentado na Fig. 7, como exemplo, o polígono de “N” lados na frequência de 660Hz, frequência essa que apresentou a maior DTHI vista do PAC.

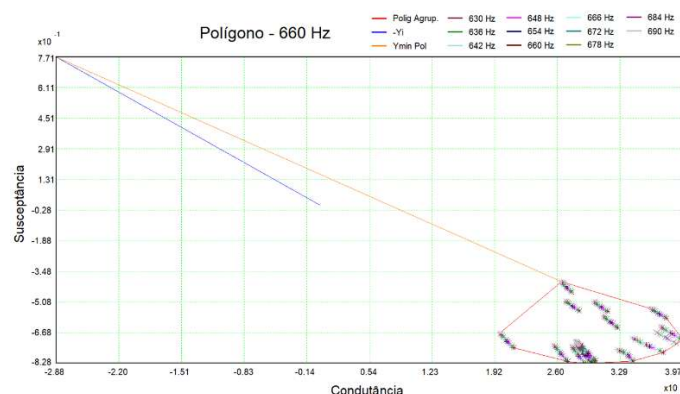


Fig. 7. Polígono de “N” lados em 660 Hz no software Harmzs.

VI. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Diante do exposto, a análise do RNS no sistema 14 barras do IEEE demonstrou resultados satisfatórios, validando a eficácia do dispositivo na regulação da tensão, reduzindo o nível de tensão de 1,07 pu para 1,03 pu e assim ficando dentro dos limites de tensão estabelecidos pelo ONS.

Já a análise harmônica, apresentou resultados conforme o esperado, com correntes harmônicas nas ordens $h = 12k \pm 1$, além de apresentar correntes harmônicas nas ordens 2 e 10, mas essas pode-se considerar insignificantes devido às suas pequenas magnitudes.

Destacam-se as correntes harmônicas das ordens 11, 23 e 35, por terem ultrapassado os limites toleráveis neste estudo de acesso, assim como a corrente harmônica total, que ficou aproximadamente 65% acima do limite estabelecido, o que chama a atenção para a análise deste efeito colateral do RNS quando de seu emprego na rede básica de potência.

Por fim, vale ressaltar que o RNS utilizado neste estudo possui uma potência reativa muito alta (21,5 MVAR), e que, em outros sistemas, onde a necessidade de potência reativa seja menor, as correntes harmônicas podem ser reduzidas, evitando assim a ultrapassagem dos limites toleráveis estabelecidos nos Procedimento de Rede do ONS.

VII. CONCLUSÕES

Conclui-se que o uso do RNS, quando devidamente configurado, oferece uma solução eficiente para mitigar a elevação do nível de tensão, contribuindo para a melhoria da qualidade da energia e assegurando o cumprimento dos requisitos de acesso à rede básica, o que, por sua vez, garante a estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico nacional.

Os resultados da simulação com a inserção do RNS indicaram a presença de correntes harmônicas, o que é esperado devido ao comportamento não linear do dispositivo. No entanto, as ordens harmônicas individuais 11, 23 e 35, bem como a corrente harmônica total, excederam os limites toleráveis estabelecidos pela ONS.

Diante dessa inconformidade, é necessário realizar estudos futuros para a implementação de filtros harmônicos, com o objetivo de reduzir essas correntes harmônicas para níveis aceitáveis, permitindo que o agente se ajuste aos limites toleráveis, ou ainda, outro dispositivo de mitigação de distorções harmônicas.

REFERÊNCIAS

- [1] Patil, A.; Girgaonkar, R.; Musunuri, S.K. "Impacts of increasing photovoltaic penetration on distribution grid—Voltage rise case study", In Proceedings of the ICAGE 2014—International Conference on Advances in Green Energy, Melbourne, Australia, 25 February 2014.
- [2] Marcílio Q. M. "Avaliação do Efeito Ferranti em Linhas Aéreas de Transmissão de Potência Natural Elevada", Sociedade Brasileira de Automática, Vol. 2, No.1, 2020.
- [3] Chaves, C. S. "Projeto, Modelagem e Avaliação da Eficácia dos Reatores a Núcleo Saturado ao Processo da Regulação de Tensão", Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- [4] M. A. Carvalho, "Aplicação de Reatores Saturados em Sistemas de Transmissão", in Proc. XIII SNPTEE, Camboriú-SC, Brasil, Out. 1995.
- [5] IEC. International Electrotechnical Commission. IEC 61400-21-1: Wind turbine generator systems - Part 21-1: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid-connected wind turbines - General guidelines. 1. ed. Geneva: IEC, 2019;
- [6] VASCONCELLOS, A. B. "Modelagem, Projeto e Construção de Compensadores Estáticos tipo Reator a Núcleo Saturado Para Melhoria da Qualidade da Energia: Análise Computacional e Validação Experimental". Tese Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Setembro de 2004.
- [7] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). "Gerenciamento dos Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica da Rede Básica". Submódulo 2.8, Disponível em: <https://www.ons.org.br/ProcedimentosDeRede/M%C3%B3dulo%202/Subm%C3%B3dulo%202.8/Subm%C3%B3dulo%202.8.pdf>. Acesso em: 06 Dezembro 2024, pág. 14.
- [8] HarmZs-CEPEL. Disponível em: <https://www.cepel.br/produtos/harmzs/>. Acesso em: 23 dez. 2024.
- [9] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). "Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica". Submódulo 2.9, Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes/>. Acesso em: 23 dez. 2024, pág. 10.
- [10] IEEE Reliability Test System," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-81, no. 6, pp. 1801-1814, 1962.