

Análise do Impacto da Integração de Plantas de Hidrogênio Verde no Sistema Elétrico: Estudo Harmônico Utilizando o Software HarmZs e o Arranjo de 14 Barras do IEEE

Jordana Alves de Freitas
Laboratório de Qualidade da Energia
Elétrica (LabQEE)
Universidade Federal de Uberlândia
(UFU)
Uberlândia, Brasil
ORCID: 0009-0009-2513-1991

Erikc José Ferreira Santos
Laboratório de Qualidade da Energia
Elétrica (LabQEE)
Universidade Federal de Uberlândia
(UFU)
Uberlândia, Brasil
ORCID: 0009-0005-8701-8178

Matheus Corrêa Mendes
Laboratório de Qualidade da Energia
Elétrica (LabQEE)
Universidade Federal de Uberlândia
(UFU)
Uberlândia, Brasil
ORCID: 0009-0008-4434-3984

Ivan Nunes Santos
Laboratório de Qualidade da Energia
Elétrica (LabQEE)
Universidade Federal de Uberlândia
(UFU)
Uberlândia, Brasil
ORCID: 0000-0001-8630-1354

Resumo — O hidrogênio verde tem se consolidado como uma solução promissora para a descarbonização da matriz energética global, com o Brasil tendo um importante papel nesse contexto. Todavia, a integração de plantas de hidrogênio verde à rede elétrica apresenta desafios técnicos, especialmente em relação às distorções harmônicas geradas pelos eletrolisadores, que são dispositivos não lineares. Este trabalho apresenta um estudo de caso que investiga os impactos da inserção desses dispositivos no sistema elétrico de energia, utilizando-se o arranjo de 14 barras do IEEE. Para isso, um eletrolisador foi modelado e implementado no software Matlab, utilizando um sistema conversor de potência comumente empregado em plantas de hidrogênio verde, permitindo, assim, a obtenção das correntes certificadas do equipamento. Por sua vez, o estudo de caso foi simulado no software HarmZs, possibilitando a avaliação dos requisitos de acesso e a identificação das condições técnicas necessárias para garantir a integração sustentável dessa tecnologia à rede elétrica brasileira.

Palavras-chave — hidrogênio verde, requisitos de acesso, eletrolisador, qualidade de energia, harmônicos.

Abstract — Green hydrogen has been consolidated as a promising solution for the decarbonization of the global energy matrix, with Brazil playing an important role in this context. However, the integration of green hydrogen plants into the electrical grid presents technical challenges, especially in relation to the harmonic distortions generated by electrolyzers, which are non-linear devices. This paper presents a case study that investigates the impacts of the insertion of these devices into the electrical power system, using the IEEE 14-bus arrangement. For this, an electrolyzer was modeled and implemented in Matlab software, using a power converter system commonly used in green hydrogen plants, thus allowing the equipment's certified currents to be obtained. In turn, the case study was simulated in HarmZs software, enabling the assessment of access requirements and the identification of the

technical conditions allowed to ensure the sustainable integration of this technology into the Brazilian electrical grid.

Keywords — green hydrogen, access requirements, electrolyzer, power quality, harmonics.

I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por alternativas sustentáveis de geração energética tem acelerado o desenvolvimento de tecnologias renováveis, como solar, eólica e, mais recentemente, o hidrogênio verde. Produzido a partir da eletrólise da água, o hidrogênio verde (H₂V) utiliza correntes elétricas de alta magnitude, provenientes de fontes renováveis, para separar moléculas de hidrogênio e oxigênio. Esse processo, por ser isento de emissões de carbono, torna o hidrogênio verde uma solução promissora para a descarbonização, especialmente em contextos de transição energética.

Embora as fontes renováveis representem cerca de 14% da matriz energética mundial, incluindo energia hidráulica e biomassa [1], no Brasil, essa participação atinge 49,1% da matriz energética total. No caso da matriz elétrica brasileira, a predominância de fontes renováveis é ainda mais expressiva, alcançando 89% da energia gerada, majoritariamente por usinas hidrelétricas. Esse cenário posiciona o Brasil como destaque global na produção de hidrogênio verde. Atualmente, há mais de 20 projetos em andamento no país, totalizando R\$ 188,7 bilhões em investimentos, com objetivo de consolidar o Brasil como referência mundial na produção de hidrogênio de baixo custo até 2030 [2].

A eletrólise da água, realizada por eletrolisadores, exige correntes contínuas de alta magnitude para a separação das moléculas de hidrogênio e oxigênio. A utilização de conversores de potência para transformar energia CA fornecida pela rede em corrente contínua (CC) é indispensável no funcionamento dessas plantas. Diversos tipos de

conversores CA/CC são empregados em aplicações de hidrogênio verde, cada um com características específicas em termos de eficiência, robustez e impacto na qualidade da energia elétrica. Entre as principais topologias destacam-se o Retificador Tiristor de 12 Pulsos (12-TR), o Retificador de Diodo de 12 Pulsos com Chopper Multifásico (12-DRMC) e o Retificador de Tiristor de 12 Pulsos com Filtro de Potência de Derivação Ativa (12-TRASPF) [3].

A topologia 12-TR utiliza um transformador estrela-triângulo-estrela de baixa frequência para eliminar correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordens, sendo composta por dois retificadores de 6 pulsos conectados aos enrolamentos secundários do transformador. A corrente no eletrolisador é ajustada variando o ângulo de disparo dos retificadores. Por sua vez, a topologia 12-DRMC combina retificadores de diodo de 12 pulsos com choppers multifásicos baseados em IGBTs de silício (Si) e diodos de roda livre. Esses choppers, dispostos de forma intercalada, reduzem a ondulação de corrente no eletrolisador e permitem a regulação da potência por meio da variação do ciclo de trabalho. Finalmente, a topologia 12-TRASPF une a robustez e o baixo custo do 12-TR com um filtro ativo em derivação, que compensa problemas relacionados à qualidade da energia, reduzindo as distorções harmônicas geradas no sistema [3].

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam os diagramas das topologias mencionadas [3], enquanto a Tabela I, fornece uma comparação detalhada entre elas, destacando aspectos como eficiência, custos e impactos na qualidade da energia elétrica.

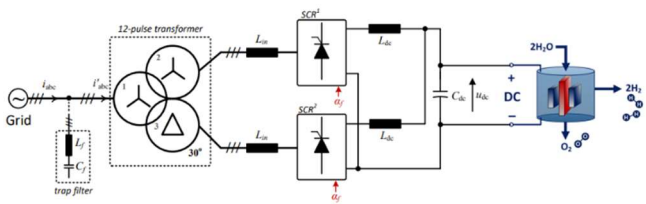


Fig. 1. Diagrama de circuito de um retificador tiristorizado de 12 pulsos com filtro de armadilha passivo (12-TR) (extraído de [3]).

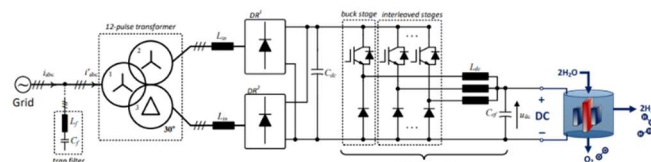


Fig. 2. Diagrama de circuito de um retificador de diodo de 12 pulsos com chopper multifásico e filtro de armadilha passivo (12-DRMC) (Extraído de [3]).

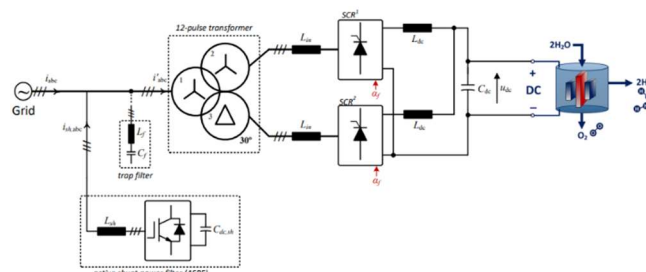


Fig. 3. Diagrama de circuito de um sistema híbrido com retificador tiristorizado de 12 pulsos e filtro de potência shunt ativo (12-TRASPF) (Extraído de [3]).

TABELA I. COMPARAÇÃO ENTRE AS TOPOLOGIAS DE CONVERSÃO DE POTÊNCIA PARA ELETROLISADORES.

Topologias	Qualidade da Energia	Eficiência	Custo	Confiabilidade
12-TR	-	+	+	++
12-DRMC	Δ	Δ	+	+
12-TRASPF	+	Δ	Δ	Δ

++ Superior; + Satisfatório; Δ Neutro; - Insatisfatório.

Fonte: Adaptado de [3].

Comparado com outras topologias, o 12-TR apresenta desempenho inferior em termos de qualidade de energia, principalmente devido à geração de distorções harmônicas. No entanto, esse retificador é uma das soluções mais maduras e eficientes em aplicações práticas de alta potência, oferecendo alta confiabilidade e eficiência. Embora o hidrogênio verde ofereça vantagens consideráveis, a integração de plantas de H₂V à rede elétrica apresenta desafios técnicos, especialmente relacionados às distorções harmônicas geradas pelos conversores de potência, que podem comprometer a qualidade da energia e a estabilidade do sistema.

No Brasil, os estudos de acesso à rede elétrica já contemplam tecnologias como energia fotovoltaica, eólica e fornos a arco. Contudo, com a crescente inserção de plantas de hidrogênio verde, é essencial expandir essas análises para avaliar seus impactos na rede elétrica e contribuir para a definição de requisitos mínimos de acesso.

Este trabalho apresenta um estudo de caso utilizando o Método do Lugar Geométrico para avaliar o impacto harmônico gerado pelos conversores em uma planta de hidrogênio verde conectada ao sistema IEEE de 14 barras, modelo amplamente utilizado como referência para simulações de impacto em redes elétricas. A análise concentra-se nas distorções harmônicas e sua propagação na rede elétrica, visando identificar os requisitos técnicos necessários para uma integração eficiente e sustentável dessas plantas, em conformidade com as normas de qualidade e os critérios regulatórios.

II. IMPLEMENTAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA EXECUÇÃO DO ESTUDO DE ACESSO DA PLANTA DE HIDROGÊNIO VERDE NO ARRANJO DE 14 BARRAS DO IEEE

Os estudos de acesso de cargas com características não lineares, no Brasil, são realizados a partir das definições estabelecidas nos Procedimentos de Rede do ONS e na Nota Técnica 009/2016. Assim, na sequência, tem-se uma visão geral das prerrogativas correlatas à esta questão, bem como a implementação do estudo de caso deste informe técnico.

A. Método do Lugar Geométrico

A metodologia adotada neste trabalho segue o Método do Lugar Geométrico (LG), recomendado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), para avaliar os impactos harmônicos de sistemas conectados ao Ponto de Acoplamento Comum (PAC). O método do LG consiste na análise da impedância harmônica da Rede Básica no plano complexo Reatância (X) versus Resistência (R) é o procedimento recomendado pelo ONS. Contudo, para calcular os piores valores de tensão harmônica no PAC, não é prático realizar um cálculo de fluxo harmônico para cada

ponto do LG com o objetivo de selecionar os valores máximos. A forma tradicional de avaliação consiste em determinar os equivalentes de Norton (I_h , $\dot{Z}_{ih}$) da Rede Interna do Agente acessante vistos do PAC para cada harmônica significativa, considerando as condições operativas possíveis dessa instalação [4].

No contexto deste estudo, o valor de I_h corresponde à corrente harmônica injetada pelo eletrolisador, enquanto $\dot{Z}_{ih}$ corresponderia à impedância equivalente dos filtros ou até mesmo de um banco de capacitores, caso esses elementos estivessem presentes. Além disso, um LG de impedância ($\dot{Z}_{ih}$) pode ser convertido em um LG de admitância ($\dot{Y}_{ih}$) no plano complexo Susceptância (B) versus Condutância (G), por meio da inversão matemática do LG de impedância entre os planos complexos.

De uma forma geral, o LG pode ser representado tradicionalmente por círculos, setores anulares, polígonos, áreas limitadas por retas e arcos de circunferências, entre outros, que envolvem com certa folga todos os pontos de impedância/admitância calculados para cada harmônica ou conjuntos de harmônicas vizinhas. Dentre os tipos de LG utilizados para representação da Rede Básica nos pontos de acoplamento comum em estudos de desempenho harmônico, o ONS recomenda o LG do Setor Anular ou, alternativamente, o do tipo Polígono de “n” Lados [4].

A impedância representativa da Rede Externa, que no presente estudo é representada pelo modelo IEEE de 14 barras, pertencente ao LG, que maximiza o valor da tensão harmônica no PAC, para cada ordem harmônica (h), é obtida por cálculo geométrico no plano complexo de admitâncias. A tensão harmônica máxima é dada por:

$$Vh_{\max} = I_h / Yh_{\min} \quad (1)$$

Onde o denominador $Yh_{\min}$ é o módulo da soma vetorial em paralelo da admitância Norton equivalente da rede do Agente (2) com a admitância correspondente ao ponto do envelope do LG de admitância da Rede Básica ($\dot{Y}_{bh}$) que minimiza $Yh_{\min}$. O ponto no envelope que corresponde a esse menor módulo é encontrado geometricamente como a menor distância do extremo do vetor $-\dot{Y}_{ih}$ ao LG de admitância harmônica da Rede Básica [4].

$$\dot{Y}_{ih} = 1 / \dot{Z}_{ih} \quad (2)$$

Independentemente da metodologia adotada para o LG, a Rede Interna é representada por um equivalente de Norton (I_h e $\dot{Y}_{ih}$) e a Rede Externa por um LG representativo das admitâncias harmônicas do Sistema do IEEE ($\dot{Y}_{bh}$) vistas do PAC, conforme ilustrado na Fig. 4 [4].

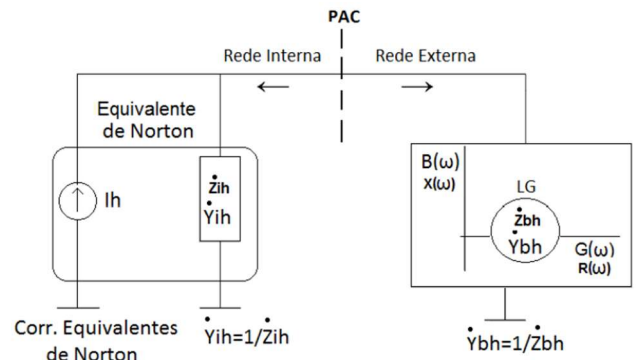


Fig. 4. Representação do Equivalente de Norton com o LG da Rede Externa (Extraído de [4]).

B. Sistema 14 Barras IEEE

A Rede Externa adotada para as simulações foi o Modelo de Rede de 14 Barras do IEEE, que representa uma seção da rede da companhia American Electric Power (AEP), localizada nos Estados Unidos. Embora os dados apresentados correspondam à configuração de fevereiro de 1962, este sistema é amplamente reconhecido como uma referência em estudos técnicos e provas de conceito na literatura especializada [5].

C. Levantamento de Níveis de Curto-Circuito

Para definir a planta de hidrogênio verde a ser inserida na rede elétrica, o sistema de 14 barras foi modelado no software ANAFAS, amplamente utilizado para cálculos de curto-circuito e análise de diversas condições de faltas em sistemas de potência [6].

As simulações dos níveis de curto-circuito em cada barramento foram utilizadas como base para identificar a barra mais adequada à conexão da planta. Os dados de curto-circuito para todas as barras, apresentados na Tabela II, foram analisados considerando critérios como níveis de tensão, conexões preexistentes, estabilidade e robustez do sistema.

TABELA II. NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO DO SISTEMA IEEE 14 BARRAS.

Barra	Vpré (pu)	Vbase (kV)	Icc (A)	Scc (MVA)
1	1,06	69	29758,9	3769,92
2	1,045	69	17712,1	2212,06
3	1,01	69	9600,3	1158,82
4	1,0294	69	11082,7	1363,57
5	1,0348	69	11240,8	1390,27
6	1,07	13,8	28611,8	731,76
7	1,0558	13,8	28914,5	729,74
8	1,09	18	16630,5	565,15
9	1,0496	13,8	25420,3	637,78
10	1,0458	13,8	20189,4	504,69
11	1,0542	13,8	18037,9	454,56
12	1,0546	13,8	14404,6	363,13
13	1,0494	13,8	19170,1	480,88
14	1,0315	13,8	14268,5	351,81

A barra 5 foi selecionada como ponto de conexão devido ao seu nível de curto-circuito favorável, conforme apresentado na Tabela II, e à ausência de máquinas síncronas conectadas, o que reduz potenciais interações dinâmicas adversas. Para garantir que a conexão seja realizada de forma segura e eficiente na tensão de 69 kV, foi definido que a potência máxima da planta representará aproximadamente 1% do nível

de curto-circuito da barra. Assim, a potência do eletrolisador foi estabelecida em 13,90 MW.

D. Correntes Certificadas

Dada a natureza inovadora das tecnologias de produção de hidrogênio verde, não há literatura específica sobre as correntes certificadas dos eletrolisadores. Nesse contexto, para a obtenção dessas correntes, foi modelado e implementado, no Simulink/MATLAB, um sistema equivalente de conversão de potência para uma planta de 13,90 MW, conforme ilustrado na Fig. 5.

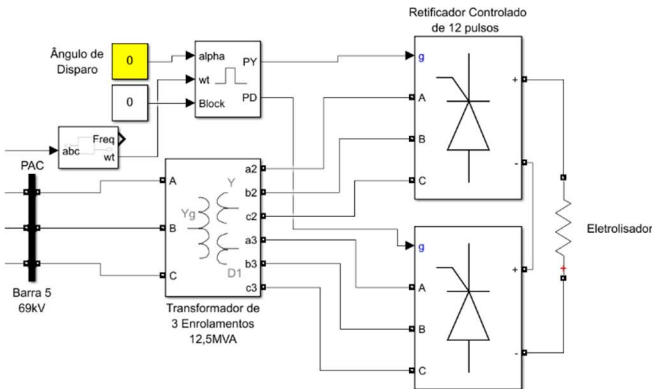


Fig. 5. Equivalente do sistema de conversão de potência do eletrolisador.

A escolha do sistema de conversão recaiu sobre o retificador controlado a tiristor de 12 pulsos, que consiste na ligação em série de dois retificadores de 6 pulsos. Esse conversor foi selecionado devido à sua ampla utilização em plantas operacionais e ao estágio avançado de implementação dessa tecnologia.

Por se tratar de uma tecnologia sem norma específica para medições de suas características elétricas, os critérios para a medição das correntes certificadas dos eletrolisadores foram adaptados da norma IEC 61400-21-1, originalmente desenvolvida para turbinas eólicas. A principal adaptação consistiu em modificar o ângulo de disparo dos tiristores, ao invés de alterar a velocidade do vento, como é feito nos aerogeradores, para avaliar o impacto na entrega de potência ao eletrolisador em diferentes condições operativas.

Para garantir a confiabilidade dos parâmetros obtidos, o sistema implementado no Simulink foi modelado com um barramento infinito, eliminando influências externas e permitindo uma análise focada exclusivamente no comportamento do sistema de conversão de potência. A potência do eletrolisador foi representada por uma resistência, visto que o objetivo do estudo é investigar as distorções harmônicas, que estão diretamente relacionadas à não linearidade do sistema de conversão.

Em sistemas de potência como o modelado, as distorções harmônicas seguem a regra do $6K \pm 1$. Entretanto, devido ao defasamento de 30° entre os terminais secundários do transformador de três enrolamentos, ocorre o cancelamento das principais harmônicas de baixa ordem, como a 5ª e a 7ª. Assim, as harmônicas predominantes para o tipo de conversor escolhido são a 11ª e a 13ª.

Para as correntes certificadas, foi adotado o maior nível de distorção harmônica registrado para cada ordem

harmônica, conforme descrito na Tabela III. Os valores obtidos estão apresentados nos valores base do equipamento.

TABELA III. CORRENTES CERTIFICADAS DO ELETROLISADOR DE 13,90 MW.

h^*	$I_{h_{\max}} (\%)$	h^*	$I_{h_{\max}} (\%)$	h^*	$I_{h_{\max}} (\%)$
2	0,2934	19	0,0328	35	0,0685
3	0,1218	20	0,0430	36	0,0058
4	0,0760	21	0,0192	37	0,1297
5	0,0663	22	0,0439	38	0,0075
6	0,1265	23	0,4937	39	0,0061
7	0,0450	24	0,0262	40	0,0099
8	0,0935	25	0,4613	41	0,0050
9	0,0930	26	0,0296	42	0,0129
10	0,0724	27	0,0299	43	0,0065
11	2,3252	28	0,0278	44	0,0172
12	0,0635	29	0,0167	45	0,0161
13	1,7244	30	0,0262	46	0,0148
14	0,0604	31	0,0170	47	0,1081
15	0,0398	32	0,0146	48	0,0143
16	0,0384	33	0,0138	49	0,1069
17	0,0387	34	0,0185	50	0,0107
18	0,0107				

*Ordem Harmônica do Sistema (Frequência = $h \cdot 60\text{Hz}$).

E. Implementação no HarmZs

O programa HarmZs é recomendado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) como ferramenta para a execução de estudos de avaliação do impacto harmônico de novas conexões na rede elétrica. Este software é amplamente utilizado para identificar os impactos de distorções harmônicas causadas por novos dispositivos conectados à rede [7].

Esses estudos exigem que o usuário execute uma série de tarefas repetitivas, tanto para carregar e alterar os dados dos casos base (incluindo a leitura dos dados de diferentes níveis de carregamento, topologias e contingências), utilizando as interfaces gráficas de entrada, quanto para exportar e armazenar os resultados (gráficos e tabelas) por meio das interfaces gráficas de saída [7].

No presente estudo, todo o sistema foi inicialmente modelado utilizando o software auxiliar EditCepel, que permite a criação e edição de dados de sistemas de potência. Após a modelagem, os dados foram exportados para a interface do HarmZs, onde foi realizada a análise de impacto harmônico. Para considerar as contingências do sistema, foi necessário gerar um novo batch no HarmZs, que avalia o impacto das falhas e desconexões dos componentes da rede.

As correntes harmônicas significativas são aquelas com uma magnitude maior ou igual a 0,1% [4]. Assim, apenas as ordens harmônicas com essa magnitude ou superior foram consideradas.

Como o modelo de 14 barras utilizado corresponde a uma rede estrangeira, não foi possível adotar as contingências previstas para os próximos 5 anos pela ONS. Dessa forma, foram consideradas todas as contingências possíveis, como a retirada de linhas, transformadores e máquinas, sendo cada uma tratada como uma contingência individual. O estudo foi limitado à 3ª vizinhança e respeitou as faixas de frequência de 120 Hz a 3000 Hz, com incrementos de 6 Hz. A representação adotada para o Lugar Geométrico foi o

polígono de "n" lados, respeitando também o intervalo (h-0,5, h, h+0,5) [4].

Como resultado, o software identificou um total de 37 contingências, conforme ilustrado na Fig. 6, e gerou um arquivo .PRX, conhecido como "nuvem de pontos". Nesse contexto, cada contingência analisada resulta em uma admitância, e o conjunto dessas admitâncias compõe a nuvem de pontos do estudo, que, por sua vez, originará o Lugar Geométrico (LG).

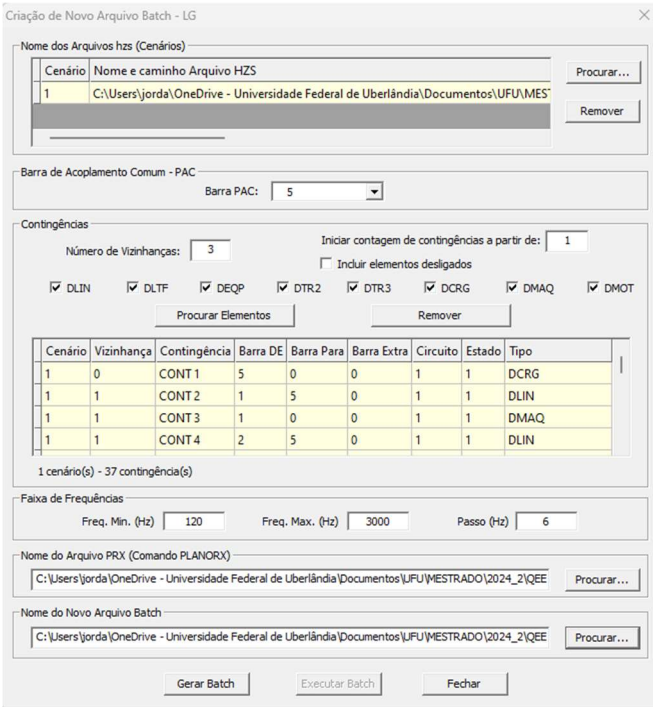


Fig. 6. Criação da Nuvem de Pontos.

III. RESULTADOS OBTIDOS E CORRESPONDENTE ANÁLISE CRÍTICA

Como previamente estabelecido nesta pesquisa, o estudo do impacto harmônico foi conduzido considerando a inserção de um equipamento de aproximadamente 1% da potência de curto-circuito do barramento escolhido, a barra 5. O valor de Ih inserido correspondeu às distorções geradas por uma unidade do eletrolisador em estudo, cuja potência é de 13,90 MW, devidamente modelada e implementada para a análise.

Para atender aos critérios normativos, os procedimentos de rede definidos pelo ONS determinam limites para distorção harmônica total (DHT) e tensões harmônicas individuais, que variam conforme a faixa de tensão e a ordem harmônica. Os limites estão descritos na Fig. 7.

13,8 kV ≤ V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)
3 a 25	1,5%	todos	0,6%	3 a 25	0,6%	todos	0,3%
≥27	0,7%			≥27	0,4%		
DHTS95% = 3%				DHTS95% = 1,5%			

Fig. 7. Limites individuais em porcentagem da tensão fundamental (Extraído de [8]).

A partir da Nuvem de Pontos gerada no software HarmZs, foram obtidos os valores máximos de distorção harmônica da tensão no PAC avaliado (barra 5), bem como o Lugar Geométrico (LG) para cada ordem harmônica. Os resultados

das distorções individuais e da distorção total estão apresentados na Tabela IV.

TABELA IV. NÍVEIS DE DISTORÇÃO OBTIDOS A PARTIR DO LUGAR GEOMÉTRICO.

Ordem Harmônica	Frequência (Hz)	DHI* Máx (%)
2	120	0,1133
3	180	0,0551
6	360	0,05
11	660	2,1746
13	780	0,9776
23	1380	1,758
25	1500	1,4857
37	2220	0,1478
47	2820	0,2137
49	2940	0,1523
DHT** Máxima (%)		3,3304

*DHI – Distorção Harmônica Individual de Tensão.
**DHT – Distorção Harmônica Total de Tensão.

A Fig. 8 apresenta o gráfico que relaciona os valores obtidos para as distorções harmônicas individuais (DHI) com os limites normativos estabelecidos para cada ordem. Esse gráfico permite uma visualização clara das ordens harmônicas mais críticas, evidenciando que a 11ª, 13ª, 23ª e 25ª ordem ultrapassou significativamente o limite estabelecido.

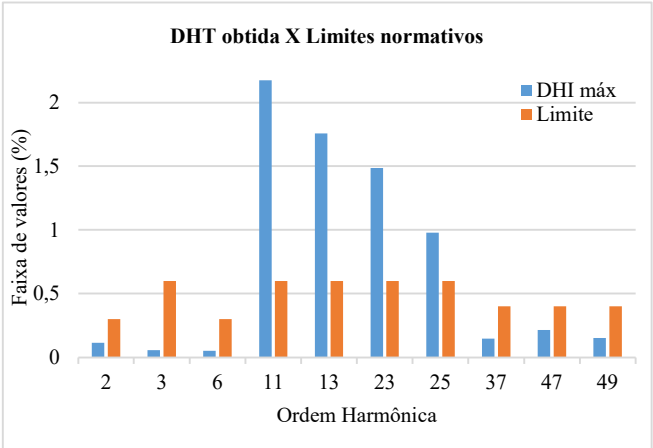


Fig. 8. Relação entre as distorções individuais obtidas e os limites estabelecidos em norma para cada ordem.

O polígono de n lados, gerado para representar o Lugar Geométrico de admitância da rede para a 11ª ordem harmônica, correspondente à frequência de 660 Hz, é apresentado na Fig. 9. Este polígono foi construído com base nas contingências avaliadas no modelo IEEE de 14 barras, delimitando as regiões críticas no plano complexo onde os pontos de maior impacto harmônico podem ocorrer.

Com base nos resultados obtidos neste estudo, observa-se que a inserção de uma unidade do eletrolisador de 13,90 MW na barra 5 resultou na violação de 4 limites individuais de tensão harmônica, nas ordens 11ª, 13ª, 23ª e 25ª, características para o tipo de conversor implementado, sendo a ordem 11ª a que mais infringe o limite. A distorção harmônica total (DHT) alcançou 3,33%, um valor superior ao limite de 1,5% estabelecido para tensões iguais ou superiores a 69 kV, conforme o submódulo 2.8 da ONS [8].

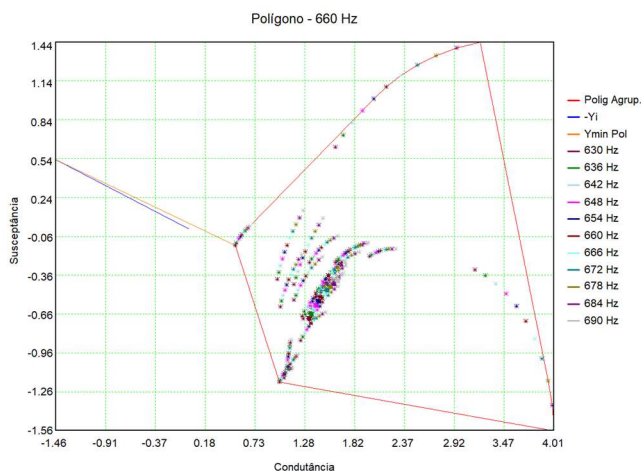


Fig. 9. Polígono de n lados para 660 Hz.

IV. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo evidenciaram a violação dos limites normativos de tensão harmônica, conforme estabelecido pelas diretrizes vigentes. Essa constatação reforça a necessidade de atenção à qualidade de energia em cenários que envolvam a integração de plantas de hidrogênio verde (H_2V) às redes elétricas.

Considerando o impacto observado, o próximo passo deste estudo harmônico, conforme o fluxo normativo, consiste na realização de campanhas de medição em campo, com o objetivo de confirmar os níveis de distorção identificados nas simulações. Caso essas medições validem a violação, deve-se prosseguir com o dimensionamento e a implementação de filtros harmônicos.

A demanda por correntes contínuas de alta magnitude, característica do processo de eletrólise, configura-se como o principal fator para a introdução de distorções harmônicas significativas. Tal comportamento evidencia os desafios técnicos impostos pela tecnologia de H_2V , especialmente no que se refere à manutenção dos indicadores de qualidade de energia dentro dos limites regulamentares.

Nesse contexto, a adaptação de normas existentes, como a IEC 61400-21-1 para medição de características elétricas, pode ser considerada uma medida transitória. Contudo, diante das particularidades do setor de hidrogênio verde, será necessário, a longo prazo, o desenvolvimento de diretrizes normativas específicas que viabilizem uma integração mais eficiente e segura dessas plantas ao sistema elétrico do hidrogênio verde na matriz energética brasileira e mundial.

Por fim, recomenda-se que trabalhos futuros considerem os níveis de distorção obtidos neste estudo e aprofundem a análise e a implementação de diferentes topologias de filtros passivos harmônicos, com o objetivo de identificar a configuração mais eficiente e adequada às condições observadas. Além disso, sugere-se investigar o impacto da inserção de múltiplas plantas de H_2V em um mesmo sistema elétrico. Espera-se, com isso, contribuir para o avanço da integração sustentável do hidrogênio verde na matriz energética brasileira e mundial.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e

Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido à pesquisa através do fomento de bolsas de mestrado.

REFERÊNCIAS

- [1] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), "Matriz Energética e Elétrica," 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcedenergia/matriz-energetica-e-eletrica>.
- [2] CNN Brasil, "Projetos de hidrogênio verde somam mais de R\$ 188 bilhões em investimentos, diz CNI," 2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/macroeconomia/projetos-de-hidrogenio-verde-somam-mais-de-r-188-bilhoes-em-investimentos-diz-cni/>.
- [3] M. Chen, S.-F. Chou, F. Blaabjerg, e P. Davari, "Overview of Power Electronic Converter Topologies Enabling Large-Scale Hydrogen Production via Water Electrolysis," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 4, p. 1906, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app12041906>.
- [4] 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 – Rev. 3, Rio de Janeiro, RJ, Abril 2019.
- [5] R. D. Barbosa, Análise de sensibilidade de metodologias para monitoramento da segurança do sistema elétrico quanto à estabilidade de tensão," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.
- [6] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), "Anafas 2," 2023. Disponível em: <https://www.cepel.br/produtos/anafas-2/>.
- [7] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), "HarmZs," 2023. Disponível em: <https://www.cepel.br/produtos/harmzs/>.
- [8] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), "Submódulo 2.8 – Procedimentos de rede: Requisitos de desempenho para conexão de novas instalações à Rede Básica", Rev. 3, Rio de Janeiro, RJ, julho 2008.