

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O RETIFICADOR TRIFÁSICO NÃO CONTROLADO DE 6 PULSOS E O RETIFICADOR TRIFÁSICO NÃO CONTROLADO DE 12 PULSOS EM RELAÇÃO ÀS DISTORÇÕES HARMÔNICAS**  
COMPARATIVE STUDY BETWEEN THE THREE-PHASE UNCONTROLLED 6-PULSE RECTIFIER AND THE THREE-PHASE UNCONTROLLED 12-PULSE RECTIFIER REGARDING HARMONIC DISTORTIONS  
**ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE EL RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO DE 6 PULSOS Y EL RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO DE 12 PULSOS EN RELACIÓN CON LAS DISTORSIONES ARMÓNICAS**

**Warney Fernando Testa**

### RESUMO

Este artigo apresenta um estudo comparativo entre os retificadores trifásicos não controlados de 6 e 12 pulsos, com foco na análise das distorções harmônicas geradas por cada topologia. Os retificadores são amplamente utilizados em sistemas industriais para conversão de corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC), sendo essenciais em aplicações como acionamentos elétricos, sistemas de alimentação e processos eletroquímicos. No entanto, a presença de harmônicas na rede elétrica pode causar diversos problemas, como perdas adicionais, aquecimento de equipamentos e interferência em sistemas de comunicação. Por meio de simulações e revisão bibliográfica, foram avaliados os níveis de distorção harmônica total (THD) das correntes de entrada de ambas as configurações. Os resultados demonstram que o retificador de 12 pulsos (THD entre 8 e 10%) apresenta desempenho significativamente superior na mitigação de harmônica em comparação ao de 6 pulsos (THD entre 27 e 31%).

**Palavras-chave:** Conversores; Distorção Harmônica; THD.

### ABSTRACT

This article presents a comparative study between 6-pulse and 12-pulse uncontrolled three-phase rectifiers, focusing on the analysis of harmonic distortions generated by each topology. Rectifiers are widely used in industrial systems for converting alternating current (AC) to direct current (DC), being essential in applications such as electric drives, power supply systems, and electrochemical processes. However, the presence of harmonics in the power grid can cause several problems, such as additional losses, equipment overheating, and interference in communication systems. Through simulations and a literature review, the total harmonic distortion (THD) levels of the input currents of both configurations were evaluated. The results show that the 12-pulse rectifier (THD between 8% and 10%) performs significantly better in harmonic mitigation compared to the 6-pulse rectifier (THD between 27% and 31%).

**Keywords:** Converters; Harmonic Distortion; THD.

## RESUMEN

Este artículo presenta un estudio comparativo entre los rectificadores trifásicos no controlados de 6 y 12 pulsos, con enfoque en el análisis de las distorsiones armónicas generadas por cada topología. Los rectificadores se utilizan ampliamente en sistemas industriales para la conversión de corriente alterna (CA) en corriente continua (CC), siendo esenciales en aplicaciones como accionamientos eléctricos, sistemas de alimentación y procesos electroquímicos. Sin embargo, la presencia de armónicos en la red eléctrica puede causar diversos problemas, como pérdidas adicionales, calentamiento de los equipos e interferencias en los sistemas de comunicación. Mediante simulaciones y revisión bibliográfica, se evaluaron los niveles de distorsión armónica total (THD) de las corrientes de entrada en ambas configuraciones. Los resultados demuestran que el rectificador de 12 pulsos (THD entre 8 y 10%) presenta un desempeño significativamente superior en la mitigación de armónicos en comparación con el de 6 pulsos (THD entre 27 y 31%).

**Palabras clave:** Convertidores; Distorsión Armónica; THD.

## 1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento do uso de cargas não lineares em sistemas elétricos, tornou-se essencial compreender o impacto das distorções harmônicas na qualidade da energia. Dentre essas cargas, destacam-se os circuitos retificadores, dispositivos microeletrônicos que realizam a conversão de energia CA para CC. Os retificadores trifásicos não controlados são amplamente utilizados devido à sua simplicidade, robustez e baixo custo. No entanto, eles introduzem harmônicas na corrente elétrica de entrada, afetando negativamente o sistema elétrico. (Moreno, 2019)

Este artigo tem como objetivo comparar dois tipos de circuitos retificadores trifásicos não controlados: o de 6 pulsos e o de 12 pulsos. A análise foca na avaliação das distorções harmônicas geradas por cada topologia, utilizando como critério principal o índice de Distorção Harmônica Total (THD). O estudo busca contribuir para a escolha mais adequada de retificadores em função dos requisitos de qualidade de energia.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Retificadores Trifásicos Não Controlados

Retificadores não controlados utilizam diodos como elementos de comutação, conduzindo corrente apenas em um sentido de fluxo de corrente elétrica. O retificador trifásico de 6 pulsos é a topologia básica, formada por dois conjuntos de três diodos ligados em ponte. Já o retificador de 12 pulsos é uma combinação de dois retificadores de 6 pulsos alimentados por transformadores com defasagem (normalmente Y-Δ e Y-Y), com o objetivo de reduzir as harmônicas que são geradas pela utilização desta topologia de circuito microeletrônico.

### 2.2 Distorções Harmônicas

A distorção harmônica é a deformação da forma de onda da corrente ou tensão elétrica quando se efetua a comparação em relação à senoidal pura. Este parâmetro é expresso pelo índice THD, o qual é definido pela norma IEEE 519 como esta ilustrado na equação (1)

$$\frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (1)$$

Por meio da análise da equação (1), pode-se verificar que  $I_n$  são as componentes harmônicas e  $I_1$  é a componente fundamental. Altos valores de THD indicam maior poluição harmônica, isto é, uma maior parcela de ruído adicionado ao sinal original. Dentro deste contexto, verifica-se que a presença de distorção harmônica em retificadores pode levar a uma série de problemas, como aumento da perda de energia, aquecimento excessivo dos componentes, redução da vida útil dos equipamentos e mau funcionamento de dispositivos sensíveis. Por isso, é importante monitorar e controlar a distorção harmônica para garantir o bom desempenho dos sistemas.

Ademais, verifica-se que as principais causas da distorção harmônica em retificadores incluem a presença de cargas não lineares, como motores de indução, fontes de alimentação chaveadas e dispositivos eletrônicos com retificadores não lineares. Esses equipamentos introduzem harmônicos na rede elétrica, causando distorção na forma de onda. (Moreno.2019)

Outra característica relevante no estudo do parâmetro da distorção harmônica refere-se à situação em que está métrica pode afetar significativamente a eficiência energética dos sistemas elétricos, uma vez que os harmônicos adicionais aumentam as perdas de energia nos cabos, transformadores e outros componentes do sistema. Isso pode resultar em um aumento nos custos de operação e manutenção destes equipamentos a médio e longo prazo. (Moreno,2019).

Existem várias formas de mitigar a distorção harmônica em retificadores, como o uso de filtros passivos ativos, a instalação de transformadores com enrolamentos especiais para reduzir os harmônicos, assim como a adoção de circuitos retificadores de ponte completa com controle de fase. Essas medidas ajudam a minimizar os efeitos negativos da distorção harmônica.

### 3 METODOLOGIA

O estudo foi conduzido por meio de simulações utilizando *software* especializado (Power Simulation-PSIM-9.1). Foram modeladas duas configurações: um retificador de 6 pulsos e um de 12 pulsos, ambos submetidos à mesma carga resistiva. Os parâmetros das fontes e transformadores foram mantidos constantes, de forma a garantir condições equivalentes. Foram analisadas as formas de onda da corrente de entrada e determinado o valor de THD para cada caso, por meio da utilização do simulador PSIM.

### 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

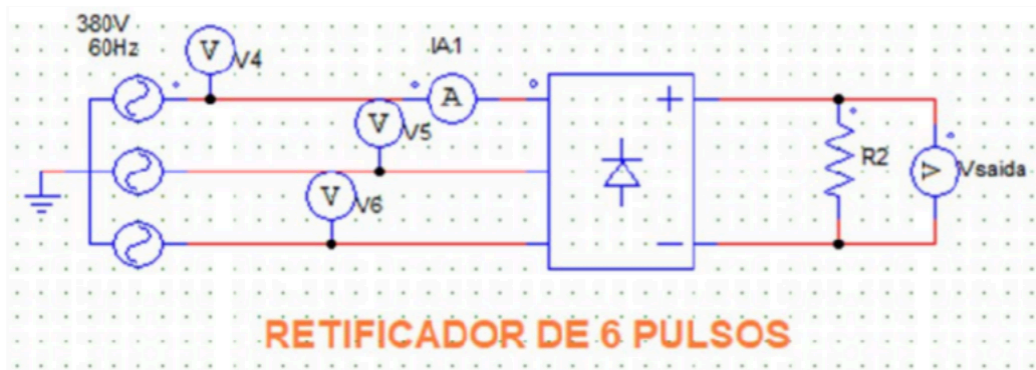
A THD é definida em consequência da necessidade de se determinar numericamente as harmônicas presentes em um dado ponto da instalação.

A THD indica a distorção harmônica total em relação a componente fundamental, enquanto a THD representa o grau de distorção harmônica total em relação ao sinal total.

No Brasil ainda não foram definidos valores normalizados para THD nas instalações internas dos consumidores. Nesse caso, uma sugestão é adotar os valores máximos estabelecidos na norma IEEE 519

A simulação do retificador de 6 pulsos apresentou uma corrente de entrada com fortes componentes harmônicas de ordens 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup>, entre outras. O valor de THD registrado foi de aproximadamente 27% a 31%, dependendo das condições de carga. A topologia de retificação em análise foi implementada e simulada no ambiente PSIM, conforme detalhado na Figura 1.

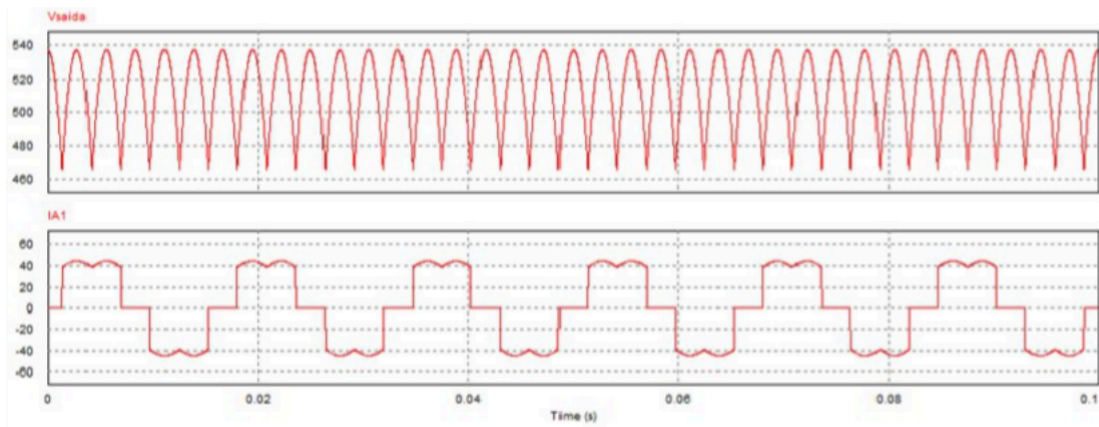
Figura 1 - Retificador trifásico não controlado de 6 pulsos



Fonte: Elaboração do autor (2025)

O esquema apresentado na figura 1 ilustra a configuração básica de um circuito retificador trifásico em ponte (seis pulsos) não controlado. O circuito de entrada é alimentado por uma fonte de tensão trifásica simétrica de 380Vrms e 60Hz, conectada em Y (estrela) com o ponto neutro aterrado. As tensões de linha são monitoradas por três voltímetros (V4, V5, V6), e a corrente de linha é aferida pelo amperímetro (IA1), antes de adentrar a ponte retificadora. Na saída, o circuito alimenta uma carga puramente resistiva (R2), onde a tensão de saída contínua (Vsaida) é determinada. Esta configuração é o padrão para a conversão AC/DC em sistemas de média a alta potência, minimizando a ondulação e maximizando o fator de potência de entrada. A análise do comportamento dinâmico do retificador trifásico é de fundamental importância, sendo que as formas de onda da tensão de saída e da corrente de entrada de fase são apresentadas na Figura 2.

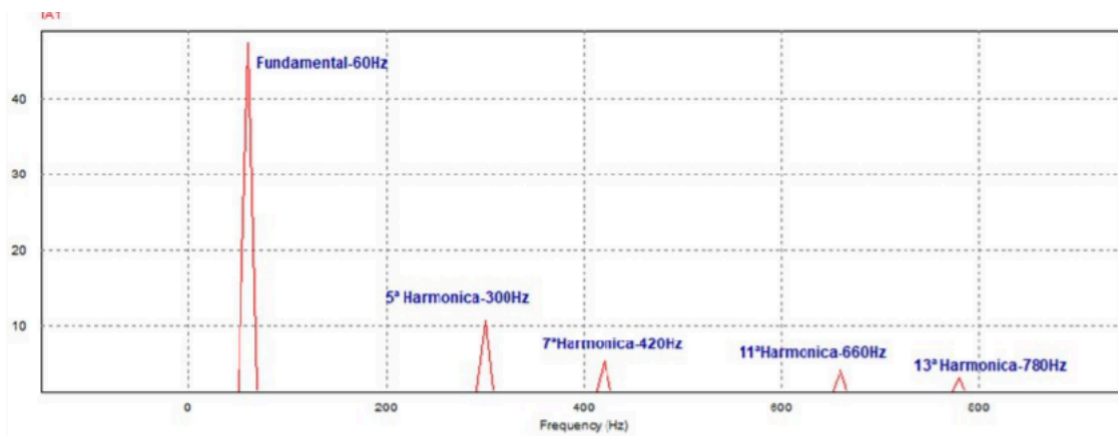
Figura 2 Formas de onda da tensão de saída e corrente de entrada de uma fase



Fonte: Elaboração do autor (2025)

Conforme pode ser observado na Figura 2, verifica-se a simulação para a tensão de saída e a corrente de entrada do circuito retificador em análise. O gráfico superior exibe a tensão  $V_{saída}$ , caracterizada por um comportamento pulsante de seis pulsos por ciclo da rede. O gráfico inferior, por sua vez, demonstra a corrente de entrada de linha  $I_{A1}$ , que exibe o formato característico de onda quadrada truncada, resultante da operação de chaveamento da ponte de diodos. Nota-se que o pico da corrente atinge aproximadamente 50 A, e a natureza não senoidal desta forma de onda confirma a presença de elevadas harmônicas de baixa ordem, impactando de maneira significativa o fator de potência. Para quantificar o impacto da corrente não senoidal no sistema, realizou-se a análise harmônica da corrente de entrada, cujo espectro de frequência pode ser visualizado na Figura 3

Figura 3 - Espectro de frequência do retificador 6 pulsos



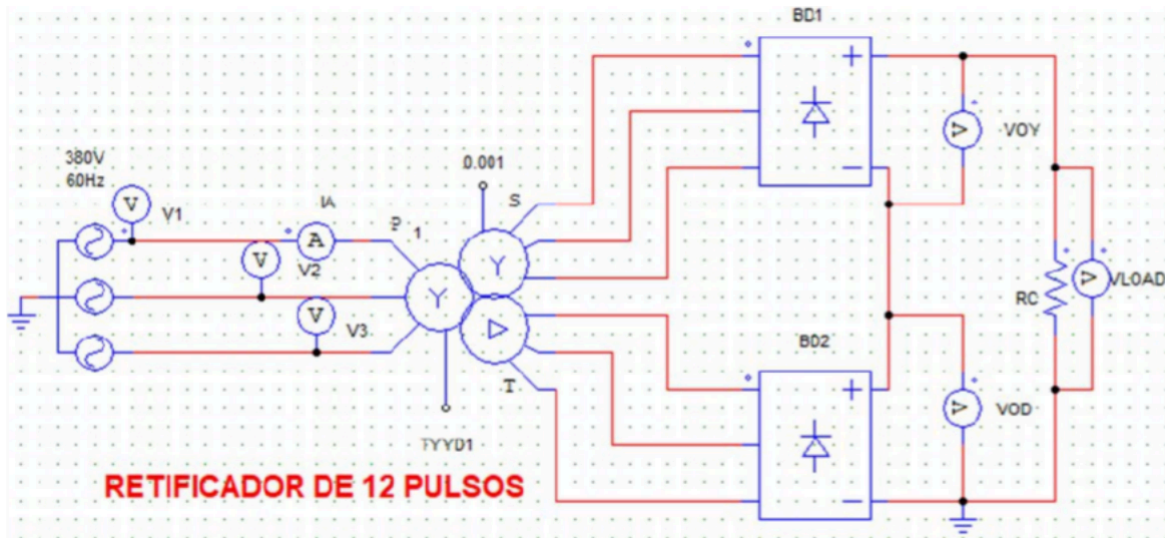
Fonte: Elaboração do autor (2025)

A Figura 3 apresenta o espectro harmônico da corrente de entrada ( $I_{A1}$ ), obtido por meio da utilização da Transformada Rápida de Fourier (FFT). O componente fundamental, com frequência de 60 Hz, possui a maior magnitude, atingindo aproximadamente 48 A. Em um retificador de seis pulsos ideal, as harmônicas características são de ordem  $h = n \times p \pm 1$ , onde  $p=6$  é o número de pulsos e  $n$  é um número inteiro. Dentro deste contexto, verifica-se que o gráfico confirma a presença predominante de harmônicas de ordens ímpares não múltiplas de três, como a 5ª harmônica (de valor igual a 300 Hz), 7ª harmônica (de valor igual a 420 Hz), 11ª harmônica (660 Hz) e a 13ª harmônica (de valor igual a 780 Hz).

Deve-se ressaltar que a 5ª harmônica é a mais significativa após a fundamental, com uma amplitude próxima de 13 A, e estas componentes harmônicas confirmam a distorção da corrente e a necessidade de mitigação para atender aos padrões de qualidade de energia.

Assim como foi realizada a simulação do retificador de 6 pulsos, será feita a do retificador de 12 pulsos realizar-se-á a simulação pelo *software* PSIM, conforme descrição abaixo através do circuito apresentado na Figura 4 e simulado e o resultado obtido.

Figura 4 Retificador não controlado de 12 pulsos

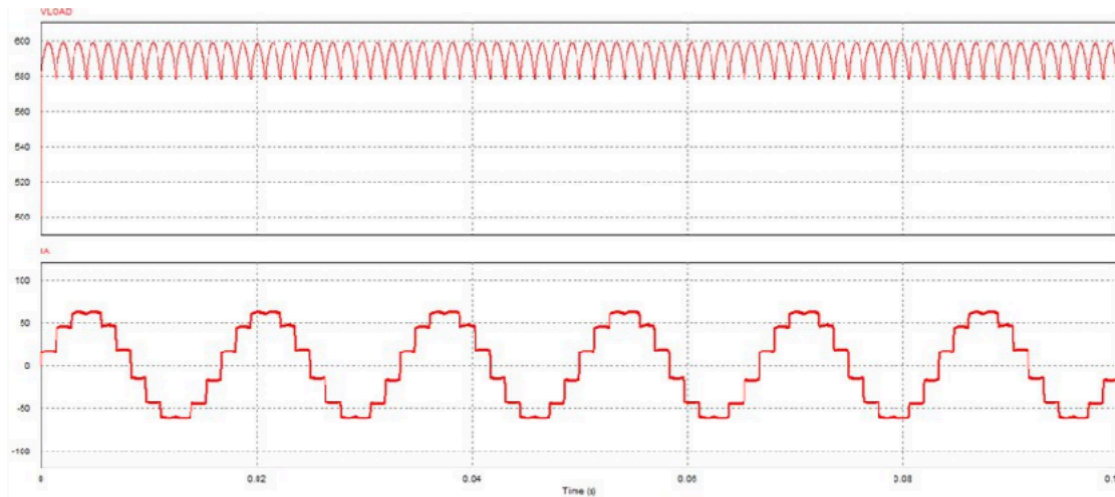


Fonte: Elaboração do autor (2025)

O esquema apresentado na Figura 4 ilustra a configuração básica de um retificador trifásico com dois transformadores (doze pulsos) não controlado. O circuito de entrada é alimentado por uma fonte de tensão trifásica simétrica de  $380\text{ V}_{\text{RMS}}$  e 60 Hz, conectada em Y (estrela) com o ponto neutro aterrado. As tensões de fase são monitoradas por três voltímetros ( $V_4$ ,  $V_5$ ,  $V_6$ ), e a corrente de linha é aferida pelo amperímetro ( $I_{A1}$ ) antes de adentrar aos dois transformadores (Y-Y) e (Y- $\Delta$ ) e depois ligados a dois retificadores de seis pulsos conectados em série.

Na saída, o circuito alimenta uma carga puramente resistiva ( $R_2$ ), onde a tensão de saída contínua ( $V_{\text{saída}}$ ) é determinada. Esta configuração é o padrão para a conversão AC/DC em sistemas de média a alta potência, com doze pulsos. A análise do comportamento dinâmico do retificador trifásico é de fundamental importância, sendo que as formas de onda da tensão de saída e da corrente de entrada de fase são apresentadas na Figura 5.

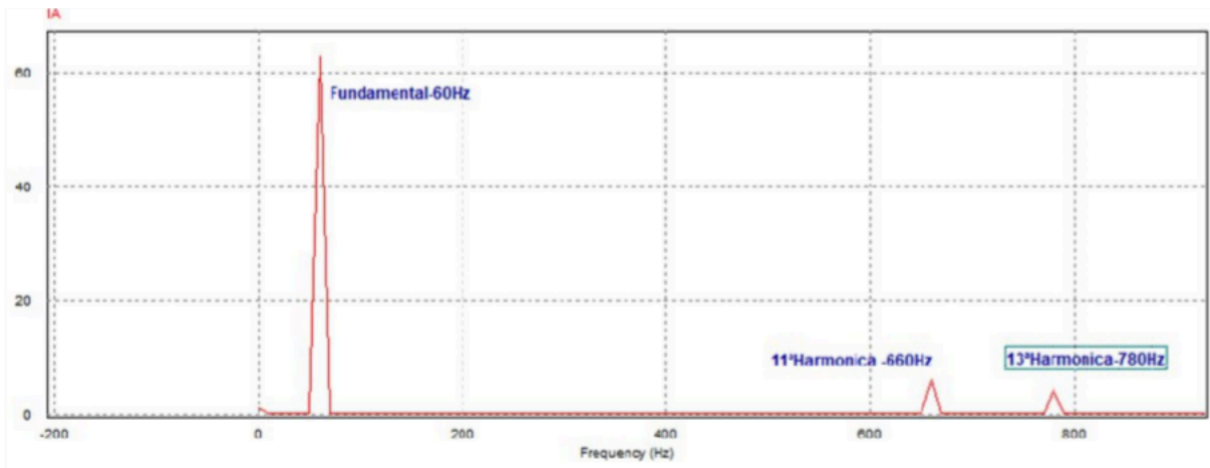
Figura 5 Tensão de saída e corrente de entrada do retificador de 12 pulsos



Fonte: Elaboração do autor (2025)

Conforme pode ser observado na Figura 5, verifica-se a simulação para a tensão de saída e a corrente de entrada do circuito retificador em análise. O gráfico superior exibe a tensão  $V_{saída}$ , caracterizada por um comportamento pulsante de doze pulsos por ciclo da rede. A natureza não senoidal desta forma de onda confirma a presença de poucas harmônicas de alta ordem, impactando de maneira significativa o fator de potência. De maneira análoga ao impacto da corrente não senoidal no sistema, realizou-se a análise harmônica da corrente de entrada, cujo espectro de frequência pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 - Espectro de frequência do retificador de 12 pulsos



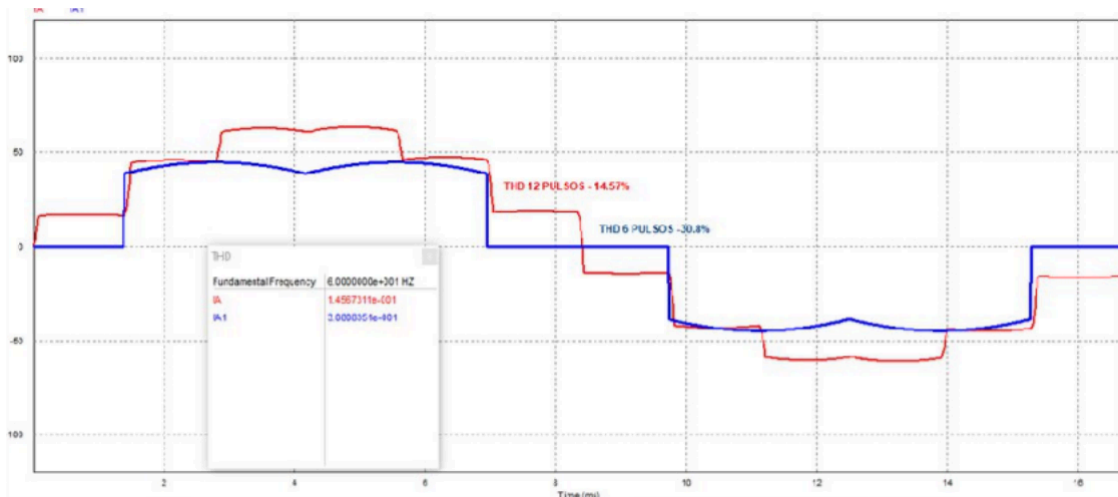
Fonte: Elaboração do autor (2025)

Por outro lado, o retificador de 12 pulsos demonstrou redução significativa nas harmônicas de baixa ordem, com predominância de ordens superiores (11<sup>a</sup>, 13<sup>a</sup>, 23<sup>a</sup>). O valor de THD ficou na faixa de 8% a 10%, indicando melhora substancial na qualidade da corrente absorvida da rede.

Esses resultados estão em conformidade com a literatura técnica, que indica que o retificador de 12 pulsos, graças ao uso de transformadores com defasagem, promove o cancelamento das harmônicas de ordem  $n = kp \pm 1$ , onde

$p$  é o número de pulsos. Para tanto é visualizado as distorções harmônicas de ambas as topologias na Figura 7

Figura 7 - THD das duas Topologias



Fonte: Elaboração do autor (2025)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo comparativo evidenciou que o retificador trifásico não controlado de 12 pulsos apresenta desempenho superior ao de 6 pulsos em termos de distorção harmônica. Embora envolva maior complexidade e custo devido ao uso de transformadores adicionais, sua utilização é recomendada em aplicações onde a qualidade da energia elétrica é fator crítico. A escolha entre as topologias deve considerar não apenas o custo inicial, mas também os impactos na operação do sistema elétrico a longo prazo.

## 6 REFERÊNCIAS

HART, D. . **Eletronica de Potencia Análise e Projetos de Circuitos**. sd. ed. Sao Paulo: MCGRAW HILL, 2012.

MORENO, H. HARMONICAS NAS INSTALAÇÕES ELETRICAS, 2019.  
Disponível em: <[www.procobre.org](http://www.procobre.org)>. Acesso em: 14 out. 2025.

U.RASHID, M. **Eletronica de Potencia - Dispositivos ,Circuitos e Aplicações**.  
4. ed. São Paulo: Pearson, 2015.

VOLPIANO, S. L. **Eletronica de Potência Aplicada ao Acionamento de Máquinas Elétricas**. sd. ed. Sao Paulo: SENAI SP EDITORA, 2013.