



## ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RETIFICADORES NÃO CONTROLADOS DE SEIS E DOZE PULSOS QUANTO À MITIGAÇÃO DE HARMÔNICOS

Humberto Cunha de Oliveira\*<sup>1</sup>, Camila de Oliveira Dias<sup>1</sup>, Isaque Nogueira Gondim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica (NQEE), Uberlândia - MG

**Resumo** - Neste trabalho, são analisadas e comparadas as formas de onda referentes às correntes e também os espectros harmônicos obtidos para retificadores trifásicos não controlados de seis e doze pulsos em situações equilibradas e desequilibradas. Para a obtenção dos gráficos e espectros, utilizou-se métodos de modelagem no domínio do tempo em consonância com os termos requeridos pelo software *Alternative Transients Program* (ATP).

**Palavras-Chave** – Distorção Harmônica, Mitigação de Harmônico, Qualidade de Energia Elétrica, Retificador de Doze Pulsos, Retificador de Seis Pulsos, Retificador não controlado.

### COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN RECTIFIERS OF SIX AND TWELVE PULSES AS REGARD HARMONIC MITIGATION

**Abstract** - In this paper, the current waveforms and the harmonic spectra obtained for six - and twelve - pulse uncontrolled three-phase rectifiers in balanced and unbalanced situations are analyzed and compared. To obtain the graphs and spectra, time-domain modeling methods were used in accordance with the terms required by the software *Alternative Transients Program* (ATP).

**Keywords** – Electric Power Quality, Harmonic Distortion, Harmonic Mitigation, Six-pulse Rectifier, Twelve-pulse Rectifier, Uncontrolled Rectifier.

### I. INTRODUÇÃO

Os retificadores são utilizados quando uma determinada carga a ser conectada é necessariamente alimentada por uma tensão contínua, enquanto o fornecimento de energia elétrica é substancialmente realizado em corrente alternada [1]. Além do grande uso doméstico, são diversos os tipos de indústrias beneficiárias de sua função como, por exemplo, laminadoras, petroquímicas, de transportes, além de unidades geradoras de energia, entre elas as usinas eólicas. Isso porque os retificadores são usados para o controle de velocidade de motores de indução, acionamento de motores de corrente contínua e transmissão de corrente contínua [2-4].

\*humberto.oliveira@ufu.br

Usados tanto em sistemas monofásicos quanto em sistemas trifásicos, os retificadores são compostos principalmente por diodos, tiristores e IGBTs. A regulação do funcionamento desses componentes é feita através do chaveamento dos mesmos. Quando esses elementos são ligados e desligados em uma certa frequência, produzem componentes de tensão e corrente não senoidais, denominadas harmônicas, comportando-se assim como cargas não lineares para o sistema. As componentes harmônicas geradas afetam negativamente o sistema e podem reduzir o fator de potência, causar em equipamentos e cabos, sobrecargas, vibrações, aquecimento, além de provocar interferências em dispositivos de comunicação, atuações errôneas da proteção, dentre outros tipos de dano [5].

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, estabelece indicadores que representam em um único valor a quantidade de distorção harmônica a qual um sistema está submetido. Além disso, impõe um limite de distorção para todos os níveis de tensão de alimentação[6]. Os mesmos são apresentados no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, sendo a última revisão com vigência iniciada no presente ano.

Com a finalidade de manter o padrão estabelecido pela ANEEL, vários consumidores utilizam retificadores de múltiplos pulsos devido à sua capacidade de reduzir as componentes harmônicas do sistema. E, nesse caso, pode ser vantajoso realizar a associação de retificadores, que pode ser feita em série ou paralelo. Dessa forma, tem-se retificadores cujo número de pulsos é múltiplo de seis. A diferença entre eles está na complexidade do sistema, com a utilização de mais componentes e nas ordens harmônicas produzidas, como pode ser observado ao longo desse trabalho, no qual são comparados os retificadores de seis e doze pulsos.

Em condições equilibradas, os retificadores geram harmônicos de forma padronizada, contudo, com a ocorrência de desequilíbrios de tensão e de carregamento no sistema, componentes harmônicas não esperadas surgem e podem elevar à distorção harmônica superior ao limite estabelecido pela ANEEL[7]. Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo elucidar os futuros profissionais da área quanto à correlação entre o uso de retificadores e a distorção harmônica gerada nas duas condições enunciadas acima. Não somente pela amplificação doméstica do seu uso, como também pela exigência do cumprimento das normas impostas pela ANEEL,

que em um futuro próximo poderá estar sob sua responsabilidade.

## II. DETERMINAÇÃO ANÁLITICA DAS COMPONENTES HARMÔNICAS GERADAS PELOS RETIFICADORES DE SEIS E DOZE PULSOS

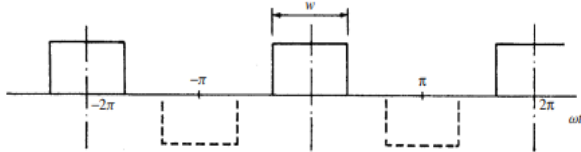
Para determinar as componentes harmônicas geradas por retificadores presentes no sistema é feita a análise através das séries de Fourier. Essa ferramenta determina que uma função não senoidal pode ser decomposta através da soma de funções senoidais conforme a equação 2.1.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nwt) + b_n \sin(nwt)] \quad (2.1)$$

Na qual,  $a_0$ ,  $a_n$  e  $b_n$  são coeficientes da série de Fourier [8].

O retificador trifásico de seis pulsos ideal não controlado é constituído por uma associação de seis diodos, três para retificar a onda alternada no ciclo positivo e três para o ciclo negativo. Normalmente, é conectado em série com um transformador Y-Y[1]. A fim de determinar os coeficientes citados para a corrente distorcida na entrada desse retificador, é necessário analisar sua forma de corrente teórica. Para esse tipo de retificador, a corrente de entrada hipotética da fase A é caracterizada por pulsos retangulares conforme Figura 1 [8].

Figura 1: Saída ideal retificador de seis pulsos trifásico Y-Y



Para questões de análise utilizou-se a referência como o centro do pulso. A forma de onda da corrente de entrada  $i(t)$  é par, ou seja,  $f(t) = f(-t)$ . Esse resultado implica em uma função de senos com  $b_n$  igual a zero. Para o retificador ideal, a largura do pulso será determinada por  $w = 2\pi/3$ . De [8], calcula-se então os coeficientes  $a_0$  e  $a_n$  através das equações (2.2) e (2.3), respectivamente.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-w/2}^{w/2} d(wt) = \frac{w}{2\pi} = \frac{1}{3} \quad (2.2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-w/2}^{w/2} \cos(nwt) d(wt) = \frac{2}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) \quad (2.3)$$

Substituindo os coeficientes calculados na equação 2.1 para o ciclo positivo, obtém-se a equação 2.4.

$$F_p = f(t) \frac{2}{\pi} \left( \frac{\pi}{3} + \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \cos(wt) + \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \cos(2wt) + \dots \right) \quad (2.4)$$

Analogamente, para o ciclo negativo obtém-se a equação 2.5.

$$F_n = f(t) \frac{2}{\pi} \left( -\frac{\pi}{3} + \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \cos(wt) - \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \cos(2wt) + \dots \right) \quad (2.5)$$

Sendo  $i_d$  a corrente contínua do retificador e somando as equações 2.4 e 2.5 é obtida a resposta em frequência para a corrente da fase A, ilustrada na equação 2.6.

$$i_{ay-y} = i_d \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left( \cos(wt) + \frac{1}{5} \cos(5wt) - \frac{1}{7} \cos(7wt) - \frac{1}{11} \cos(11wt) + \frac{1}{13} \cos(13wt) - \frac{1}{17} \cos(17wt) \dots \right) \quad (2.6)$$

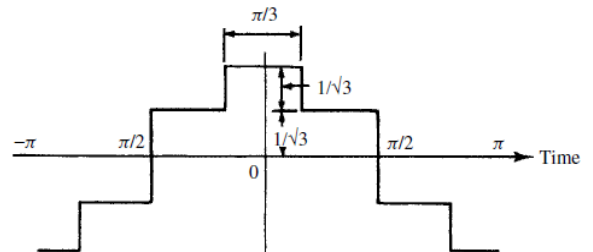
Analisando a sequência das harmônicas presentes na equação 2.6 chega-se a um padrão evidenciado na equação 2.7.

$$h = 6k \pm 1 \text{ para } k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.7)$$

Assim, são esperadas componentes harmônicas geradas pelo retificador de seis pulsos de ordens 5, 7, 11, 13, por exemplo.

O retificador de 12 pulsos é formado pela associação em série ou em paralelo, dependendo se o desejado é tensão ou corrente elevada na saída, de dois retificadores de 6 pulsos [9]. Os dois retificadores são alimentados por tensões de mesmo valor eficaz, porém existe uma defasagem de  $30^\circ$  entre os sistemas trifásicos [10]. Esse defasamento é provido pela própria conexão do transformador que alimenta o retificador, ou seja, tem-se um retificador com um transformador Y-Y e um retificador com a ligação Y- $\Delta$ . Devido à conexão do segundo transformador ser Y- $\Delta$  é necessário manter o mesmo nível de tensão do primário e secundário observados no transformador Y-Y. Assim um fator multiplicativo  $\sqrt{3}$  foi introduzido na relação de transformação deste transformador resultando em uma forma de onda da corrente na entrada do retificador, utilizando como referência o centro do pulso, ilustrada na Figura 2 [8].

Figura 2: Saída ideal retificador de seis pulsos trifásico Y- $\Delta$



Percebe-se um pulso de largura de  $w = \pi/3$  sobreposto a outro de largura  $w = \pi$ . Realizando o cálculo análogo ao do processo anterior, obtém-se a corrente da fase A do transformador Y- $\Delta$  representada na equação 2.8.

$$i_{aY-\Delta} = i_d \frac{2\sqrt{3}}{\pi} (\cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) + \frac{1}{17} \cos(17\omega t) \dots) \quad (2.8)$$

Realizando a soma das correntes representadas nas equações 2.6 e 2.8, tem-se a corrente de entrada do retificador de doze pulsos, conforme a equação 2.9.

$$i_a = i_d 2 \left( \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) (\cos(\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) - \frac{1}{23} \cos(23\omega t) + \dots) \quad (2.9)$$

Analisando a sequência das harmônicas presentes na equação 2.9 chega-se a um padrão evidenciado na equação 2.10.

$$h = 12k \pm 1 \text{ para } k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.10)$$

Neste caso, só existem harmônicos em frequências de ordem  $12k \pm 1$ . Fica claro que como a ordem é elevada, o processo de filtragem exige elementos capacitivos e indutivos de menor valor, se comparado ao retificador de seis pulsos, por exemplo [10].

Nas próximas seções são comprovados, através de simulações computacionais, os resultados obtidos nessa seção.

### III. ANÁLISE COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO DOS RETIFICADORES SUBMETIDOS A CONDIÇÕES EQUILBRADAS

#### A. Sistema equilibrado com retificador de seis pulsos

O sistema analisado computacionalmente é ilustrado na Figura 3. A montagem do circuito no software é apresentada na Figura 4.

Figura 3: Circuito seis pulsos estudado

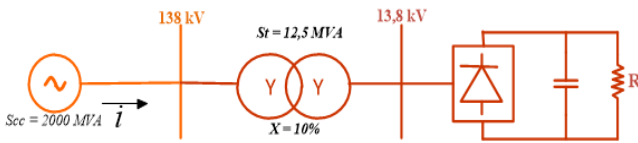
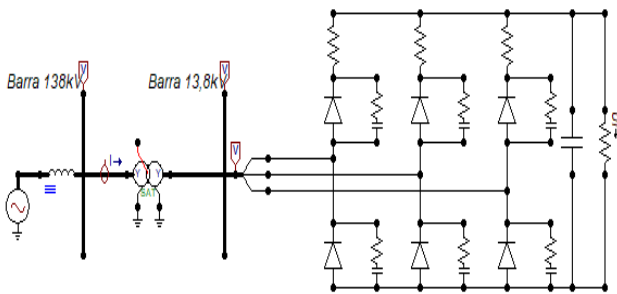


Figura 4: Circuito simulado no ATPDraw



O valor da capacitância e da resistência no elo CC do sistema foram pré-estabelecidos. A capacitância é de  $5000 \mu F$ , o valor da resistência foi projetado para 80% da potência

nominal do circuito. O comportamento a ser estudado será o da corrente trifásica na barra de 138 kV. Na tabela I, são mostrados os valores calculados.

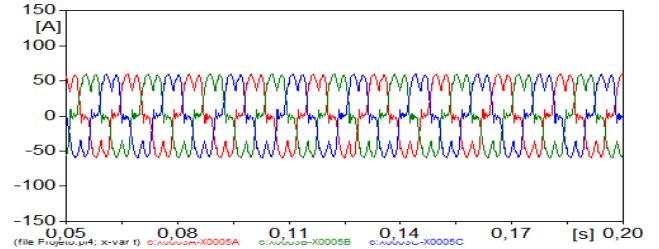
Tabela 1: Impedâncias utilizadas no caso equilibrado

Y-Y		R
X=10%		
Y	Y	
R=7,6 Ω	R=0,076 Ω	34,7076 Ω
L=202 mH	L=2,02 mH	

Para o retificador da Figura 3, foram estudados dois casos diferentes. O único parâmetro modificado foi a tensão da fonte, com o objetivo de simular um desequilíbrio no sistema.

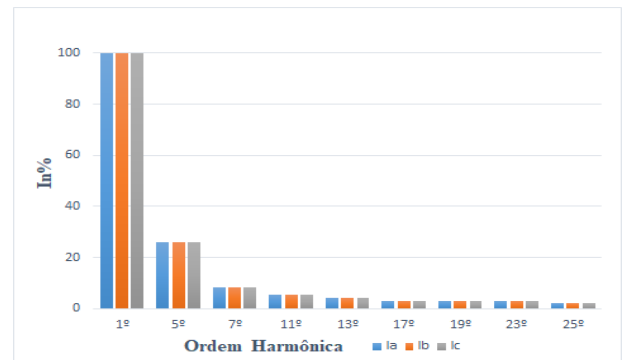
Inicialmente foi simulado o circuito para condições de tensões equilibradas. As formas de onda das correntes  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ , nas cores vermelho, verde e azul respectivamente, são observadas na Figura 5. Na Figura 6, é apresentado o espectro harmônico das correntes.

Figura 5: Correntes de entrada para o sistema equilibrado



O espectro harmônico das três fases, conforme o esperado, só exhibe harmônicas de ordem  $6k \pm 1$  e com mesma magnitude em relação ao valor da componente fundamental.

Figura 6: Comparação dos espectros harmônicos das correntes de entrada nas três fases



Para condições equilibradas, o retificador comportou-se conforme apresentado na análise teórica. No tópico seguinte, é estudado o comportamento do retificador de doze pulsos considerando a mesma condição equilibrada.

#### B. Sistema equilibrado com retificador de doze pulsos

O circuito do retificador estudado é mostrado na Figura 7. Bem como, a estrutura utilizada para simulação no ATPDraw é apresentada na Figura 8.

Figura 7: Circuito Estudado

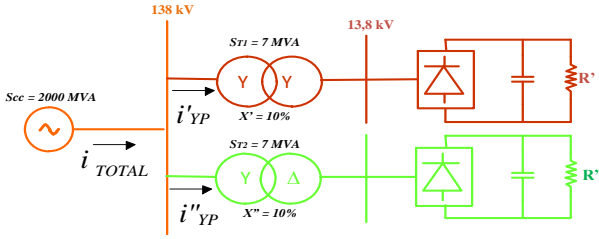
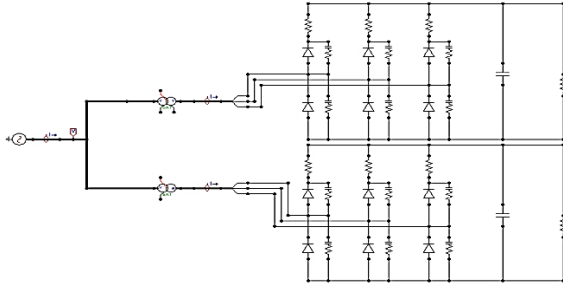


Figura 8: Circuito simulado no ATPDraw



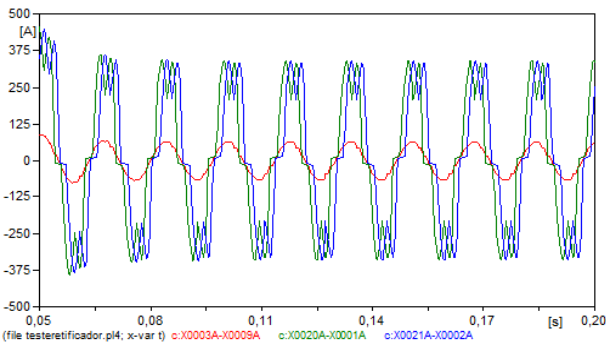
Inicialmente, foram utilizadas para os transformadores as impedâncias mostradas na Figura 7. As resistências de enrolamento foram calculadas de modo que as perdas resultassem em 1% da potência nominal do transformador. Já o capacitor utilizado no lado no qual a tensão é contínua, para minimizar o ripple na saída, foi estabelecido em 5000  $\mu\text{F}$ , assim como para o retificador de seis pulsos. Por fim, a resistência da carga foi calculada de forma que a potência dissipada na mesma corresponda a 80% da potência nominal. Na Tabela II são mostrados os valores de impedância utilizados.

Tabela 2: Impedâncias utilizadas no caso 1

Y-Y		Y- $\Delta$		$R'$	$R''$
$X'=10\%$		$X''=10\%$			
Y	Y	Y	$\Delta$		
$R=13,6\Omega$	$R=0,136\Omega$	$R=13,6\Omega$	$R=0,408\Omega$	61,98 $\Omega$	61,98 $\Omega$
$L=0,36\text{H}$	$L=3,6\text{mH}$	$L=0,36\text{H}$	$L=10,88\text{mH}$		

A Figura 9 mostra as correntes de entrada (em vermelho), na saída do transformador Y-Y (em verde) e na saída do transformador Y-  $\Delta$  (em azul). As correntes mostradas são as obtidas na fase A, visto que não há desequilíbrio entre as fases, o comportamento das três fases é o mesmo. O espectro harmônico das correntes está na figura 10.

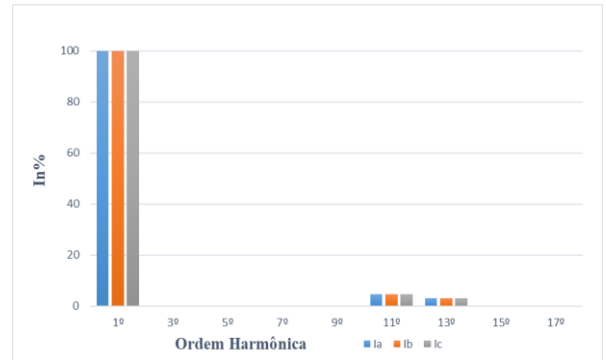
Figura 9: Correntes no sistema



É observado, através da Figura 10, que o espectro da corrente de entrada do sistema não apresenta as componentes de 5ª e 7ª ordens como o espectro característico da corrente que entra no retificador de 6 pulsos. Isso ocorre pois em um sistema equilibrado o defasamento angular proporcionado pela conexão estrela-delta é capaz de eliminar algumas ordens harmônicas.

Sabe-se que, em um sistema equilibrado de sequência ABC, a componente de 5ª ordem é de sequência negativa e a de 7ª ordem de sequência positiva. Dessa forma, ao multiplicar a defasagem pela ordem harmônica, tem-se 150° para a 5ª e 210° para a 7ª. No caso da harmônica 5, o fasor de corrente no primário estaria atrasado de 30° em relação ao primário, se a frequência fosse a fundamental. Adicionando os 150° no sentido horário, visto que a sequência é negativa, obtém-se um fasor de mesmo módulo, porém em sentido oposto ao da corrente no secundário, de forma que as duas se anulam e não há componente dessa ordem na entrada. Do mesmo modo, a harmônica de 7ª ordem é eliminada, bastando observar que, nesse caso, os 210° são adicionados no sentido anti-horário, como há o defasamento proveniente do transformador, o resultante é de 180°.

Figura 10: Comparação dos espectros harmônicos das correntes de entrada nas três fases



#### IV. ANÁLISE COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO DOS RETIFICADORES SUBMETIDOS A CONDIÇÕES DESEQUILBRADAS

Para atingir condições desequilibradas de tensão, foram inseridos na fonte valores de modo que o resultado do cálculo do fator de desequilíbrio atingisse 6%. Com tensão nominal de 138 kV, as tensões desequilibradas são exibidas na equação 4.1.

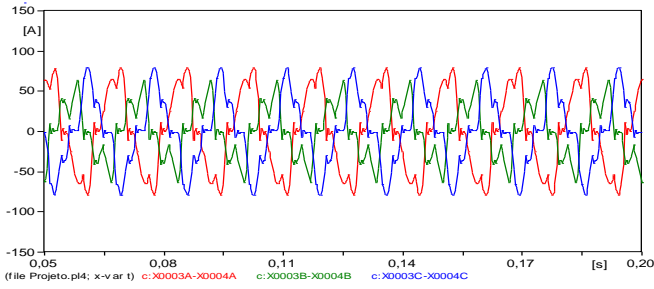
$$\begin{aligned} V_a &= 146,280 \angle 0^\circ \text{ kV} \\ V_b &= 134,052 \angle -123,066^\circ \text{ kV} \\ V_c &= 134,052 \angle 123,066^\circ \text{ kV} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Foram realizados os mesmos procedimentos detalhados na seção III, com os valores de tensão da equação 4.1. Os resultados dos casos são conferidos a seguir.

##### A. Sistema com retificador de seis pulsos submetido a desequilíbrio de tensão

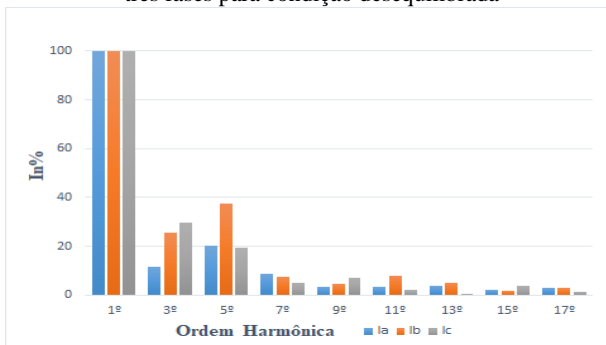
As formas de onda das correntes  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  são observadas na Figura 11.

Figura 11: Correntes de entrada para o sistema desequilibrado



Na Figura 12 são apresentados os espectros harmônicos das correntes nas três fases. É observada uma maior distorção harmônica de corrente devido ao desequilíbrio.

Figura 12: Comparação dos espectros harmônicos das correntes nas três fases para condição desequilibrada



Para o sistema equilibrado, não ocorre a aparição de componentes harmônicas de sequência zero. Já quando o sistema apresenta desequilíbrio, essas componentes, mesmo com uma pequena magnitude, compõem o espectro harmônico, não obedecendo o padrão analisado na equação 2.7.

Conforme se aumenta o desequilíbrio do sistema, maior é essa interferência harmônica no sistema, implicando em uma maior distorção harmônica total. Um valor elevado dessa distorção no sistema pode ocasionar sobrecarga na corrente eficaz do mesmo, sobrecarga nos condutores de neutro em razão da soma das harmônicas múltiplas de três, queda de tensões maiores do que as normalmente constatadas entre o neutro e o terra, disparo errôneo dos equipamentos de proteção e reduzir o fator de potência.

### B. Sistema com retificador de doze pulsos submetido a desequilíbrio de tensão

O retificador de 12 pulsos também foi submetido ao mesmo desequilíbrio de tensão aplicado ao retificador de seis pulsos. É possível perceber que as formas de onda das correntes, mostradas na Figura 13, apresentam uma distorção relativamente maior do que para o sistema equilibrado. Isso é comprovado através da Figura 14, na qual percebe-se a presença de ordens harmônicas diversas. Além de apresentar desequilíbrio entre as fases, assim como ocorre para o retificador de seis pulsos.

Figura 13: Correntes no sistema

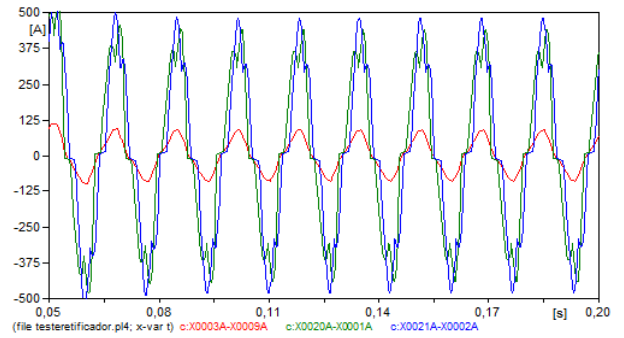
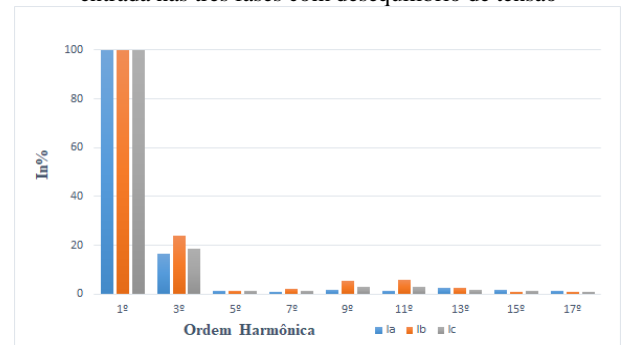


Figura 14: Comparação dos espectros harmônicos das correntes de entrada nas três fases com desequilíbrio de tensão



### C. Sistema com retificador de doze pulsos submetido a desequilíbrio de impedâncias

Para simular o desequilíbrio de impedâncias, alterou-se a impedância do transformador Y-Y, de modo que  $X''=5\%$ . Além disso, a resistência da carga do transformador Y- $\Delta$  foi reduzida pela metade, conforme apresentado na Tabela III.

Tabela 3: Impedâncias utilizadas no caso C

Y-Y		Y- $\Delta$		R'	R''
X''= 5%		X''= 10%			
Y	Y	Y	$\Delta$		
<b>R=13,6</b> <b><math>\Omega</math></b>	R=0,136 $\Omega$	R=13,6 $\Omega$	R=0,408 $\Omega$	61,98 $\Omega$	30,99 $\Omega$
<b>L=0,18H</b>	L=1,8mH	L=0,36H	L=10,88m H		

Assim como feito anteriormente, na Figura 15, são mostradas as correntes obtidas na entrada do sistema e dos retificadores e na Figura 16, os espectros harmônicos das correntes de entrada do sistema.

Figura 15: Correntes na entrada do sistema com retificador de 12 pulsos

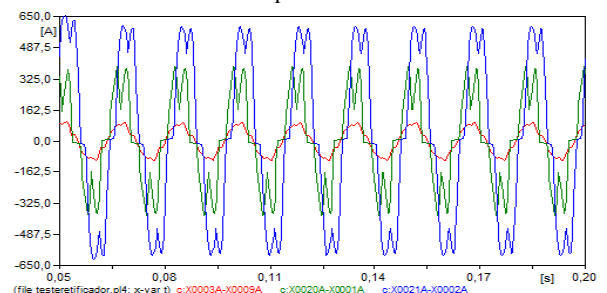
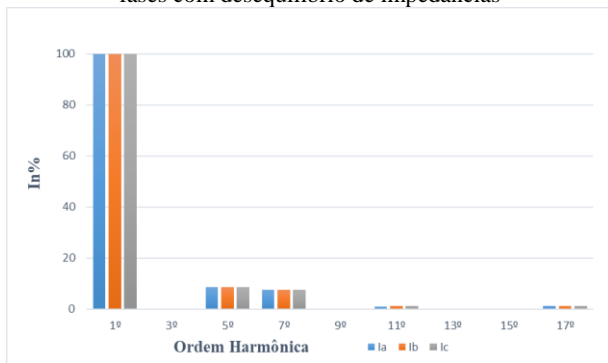




Figura 16: Espectro harmônico das correntes de entrada nas três fases com desequilíbrio de impedâncias



O espectro da corrente de entrada demonstra que apesar de ter sido utilizada uma associação que resulta em um retificador de 12 pulsos, as harmônicas de 5ª e 7ª ordens não foram eliminadas.

A permanência dessas ordens harmônicas se deve a dois fatores: desigualdades na reatância dos dois transformadores e entre as cargas conectadas nos retificadores. O primeiro resulta em diferentes tensões de entrada para os retificadores, visto que há quedas de tensões distintas nos dois transformadores. Logo, a corrente não é a mesma e os vetores, por mais que em sentidos diferentes, não se anulam, como o esperado. As cargas diferentes provocam o mesmo efeito. Por drenar correntes que não são equivalentes, é impossível que a soma vetorial entre as duas seja nula.

Ao analisar os três casos citados, é perceptível que o retificador de doze pulsos elimina as ordens indesejadas somente quando há equivalência entre as cargas conectadas aos dois retificadores são iguais, bem como entre as reatâncias dos transformadores. Além disso, é necessário que haja equilíbrio entre as tensões de alimentação. Caso contrário, além do desequilíbrio entre as fases, surgem diversas ordens harmônicas não esperadas.

## V. CONCLUSÕES

Ao comparar os espectros obtidos para as correntes de entrada, fica evidente que o retificador de doze pulsos é capaz de mitigar ordens harmônicas que existem quando é utilizado somente o retificador de seis pulsos. Dessa forma, como as ordens harmônicas presentes são mais elevadas, o processo de filtragem pode ser menos oneroso. Entretanto, é preciso observar que o retificador de doze pulsos exige a utilização de um segundo transformador, o que pode encarecer o projeto, além de requerer uma quantidade maior de diodos.

Ambos os retificadores analisados foram do tipo não controlado que, apesar de ser menos complexo por não necessitar de pulsos de disparo, não possibilita regulação automática da tensão de saída. O que inviabiliza, por exemplo, sua utilização com a finalidade de fornecer ou absorver reativos da linha em uma possível compensação.

Outro aspecto importante a ser observado é que os retificadores somente atingem o funcionamento esperado quando não há qualquer tipo de desequilíbrio. No caso do retificador de seis pulsos, qualquer discrepância entre as tensões de alimentação é capaz de provocar surgimento de

correntes harmônicas de ordem diferente de  $6k \pm 1$ . Já para o retificador de doze pulsos, também é necessário que os dois circuitos da associação tenham exatamente os mesmos parâmetros, caso contrário, a soma vetorial entre as correntes não é nula. Dessa forma, haverá harmônicos de ordem indesejada no sistema. Uma forma de tentar reduzir esse problema é colocar um indutor sobre o qual se tem a diferença instantânea das tensões de cada um dos retificadores. Sendo os mesmos iguais e alimentando a mesma carga, cada parte fornecerá metade da corrente total.

É notório que o retificador de doze pulsos pode ser bem mais vantajoso por eliminar ordens harmônicas inferiores. No entanto, é praticamente inviável manter todos os parâmetros equivalentes durante todo o tempo para garantir o efeito esperado.

## REFERÊNCIAS

- [1] POMILIO, J. A. Capítulo 3: Conversores CA-CC – Retificadores. In: Eletrônica de Potência. Campinas, 2013. 33 p.
- [2] B.P. Schmitt and R. Sommer, Retrofit of Fixed Speed Induction Motors with Medium Voltage Drive Converters Using NPC Three-Level Inverter High-Voltage IGVT Based Topology, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 746-751, 2001.
- [3] S. Bernert, Recent Development of High Power Converters for Industry and Traction Applications, IEEE Trans on Power Electronics, Vol. 15, No. 6, pp. 1102-1117, 2000.
- [4] G. O. Young, "Synthetic structure of industrial plastics (Book style with paper title and editor)," in Plastics, 2nd ed. vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw-Hill, 1964, pp. 15-64.
- [5] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan., S. Santoso., H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, 2nd Edition. USA: McGraw-Hill, 2003.
- [6] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. PRODIST: Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 8, 2017.
- [7] D. Rendusara, A. von Jouanne, P. Enjeti and D. A. Paice, "Design considerations for six pulse and twelve pulse diode rectifier systems operating under voltage unbalance and pre-existing voltage distortion with some corrective measures," IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting, Orlando, FL, USA, 1995, pp. 2549-2556 vol.3. doi: 10.1109/IAS.1995.530627.
- [8] Jos Arrillaga, Neville R. Watson, Power System Harmonics, John Wiley & Sons, 2 edition 2003, pp.85-93.
- [9] REZEK, A. J. J. Análise e simulação do conversor de 12 pulsos. Rev. Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico. Vol. 16, nº 2, 1990, Editora da EFEI.
- [10] GONÇALVES, V. A. Redução de harmônicos de corrente em retificadores de múltiplos pulsos – generalização das conexões diferenciais. 2006. 183f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Unesp, Ilha Solteira, 2006.