



## ANÁLISE EXPERIMENTAL ACERCA DOS HARMÔNICOS NÃO CARACTERÍSTICOS EM UM EQUIVALENTE INDUSTRIAL

C. R. Azevedo Jr.<sup>1\*</sup>, R. C. F. Gregory<sup>1</sup>, I. N. Santos<sup>1</sup>, G. S. Troncha<sup>1</sup>, A. C. Souza<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

<sup>1</sup>Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica

**Resumo** – A presença massiva de carregamento não-linear nas indústrias, em sua maioria composta por dispositivos eletrônicos, corrobora para a degradação da qualidade da energia elétrica do sistema, haja vista que tais cargas produzem correntes de frequências harmônicas na rede. Estas, por sua vez, causam impactos no que diz respeito à forma de onda da tensão e corrente, podendo transgredir os indicadores estabelecidos pelas agências reguladoras. Nota-se, ainda, que a operação destas cargas sob suprimentos desequilibrados acarreta o surgimento de harmônicos não característicos. À luz desses fatos, o presente trabalho tem como objetivo a avaliação experimental acerca dos harmônicos não característicos presentes no ponto de acoplamento comum entre o sistema de suprimento e um complexo industrial, visando analisar o comportamento dos mesmos na presença de distorções e desequilíbrios previamente impostos ao ponto de conexão entre supridor e consumidor.

**Palavras-Chave** – avaliação experimental, desequilíbrio, distorção harmônica de tensão, harmônicos característicos e não característicos.

### EXPERIMENTAL ANALYSIS ABOUT NON-CHARACTERIZED HARMONICS IN INDUSTRIAL EQUIVALENT

**Abstract** - The massive presence of nonlinear loading in the industries, mostly composed of electronic devices, corroborates to the degradation of the Power Quality, considering that such loads produce harmonic currents in the network. These, in turn, cause impacts with regard to the waveform of voltage and current, and may transgress the indicators established by the regulatory agency. It is also noted that the operation of these loads under unbalanced supplies entails the appearance of non-characteristic harmonics. In the basis of these facts, the present work has as objective the experimental evaluation about the noncharacteristic harmonics present at the common coupling point between the supply system and an industrial complex, aiming to analyze the behavior of the same in the presence of distortions and imbalances

previously imposed to the point of connection between supplier and consumer.

**Keywords** – experimental evaluation, imbalance, harmonic distortion of voltage, characteristic and non-characteristic harmonics.

### I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, observa-se expressivo aumento do nível de automação industrial empregado no nicho fabril. O referido crescimento contribui com uma maior inserção de cargas não lineares nas plantas industriais, sobretudo, conversores eletrônicos, utilizados no controle e acionamento de máquinas, dentre outras rotinas [1]. De fato, em regime normal de operação, os conversores eletrônicos são responsáveis pela injeção de correntes harmônicas características nas redes elétricas, as quais se manifestam em detrimento das propriedades intrínsecas dos materiais semicondutores que perfazem esses dispositivos [2]. Neste sentido, é cónito que as mencionadas distorções harmônicas podem acarretar inúmeros efeitos nocivos nas instalações elétricas, tal como amplamente explorado em [3].

Em termos gerais, conforme referência [4], além dos supracitados conversores com comutação eletrônica, outras fontes de distorção harmônica presentes no carregamento industrial, são aquelas dotadas de núcleo ferromagnético, como transformadores e máquinas elétricas sujeitos a operação na região de saturação, reator controlado a tiristor, fornos a arco, demais cargas eletrônicas como retificadores trifásicos, dentre outras, demandando assim, especial atenção dos entes públicos reguladores quanto ao nível de distorção no ponto de acoplamento comum (PAC).

A fim de limitar os impactos gerados pelos harmônicos nas redes elétricas, no Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio do Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [5], define valores de referência para os indicadores de conformidade, cujos limites devem ser mantidos visando o atendimento aos padrões da qualidade da energia elétrica (QEE) ao nível de distribuição.

É importante salientar, que, muito embora os conversores eletrônicos tenham a capacidade de contribuir com expressivas distorções harmônicas de corrente a depender de

\*craunioreel@gmail.com

sua topologia, ressalta-se que estes são idealmente projetados para operarem com tensões senoidais e equilibradas. Todavia, quando supridos por tensões com perfil pré desequilibrado (*background imbalance*), tais dispositivos podem gerar harmônicos atípicos, denominados por não característicos [6]. Nesse interim, haja vista que os sistemas de distribuição reais operam na presença de tensões trifásicas assimétricas, as quais são provocadas pela composição dos desequilíbrios oriundos dos sistemas supridor e consumidor, estudos complementares ainda se fazem necessários, afim de analisar a influência de redes não ideais sobre os harmônicos oriundos de complexos compostos por cargas eletrônicas.

A partir dos aspectos ora levantados, o presente trabalho tem por objetivo analisar os harmônicos não característicos manifestados no PAC entre um sistema de suprimento e uma planta industrial. Para tanto, utilizando-se um protótipo experimental representativo em escala reduzida, implementado no Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica (LAQEE) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), estudos são conduzidos considerando adversidades operativas atreladas à imposição de tensões com perfis pré distorcido e pré desequilibrado.

## II. HARMÔNICOS CARACTERÍSTICOS E NÃO CARACTERÍSTICOS

O sistema elétrico de um *site* industrial caracteriza-se, em sua maioria, por uma rede de alimentação trifásica que, em condição de funcionamento ideal, possui tensão senoidal de mesma magnitude e ângulo de defasamento de 120 graus entre as fases. Entretanto, tal condição em sistemas reais dificilmente são vivenciadas devido a um conjunto de fatores, quais sejam, a presença de carregamento não linear, dispositivos de controle e comutação eletrônica, operação de elementos ferromagnéticos na região de saturação, não equalização do carregamento entre as fases, dentre outros, que corroboram para a degradação das características ótimas da rede [4].

Sendo assim, de forma a limitar os danos causados por elevados percentuais de distorções harmônicas e desequilíbrios nas redes elétricas, a ANEEL, por meio do PRODIST Módulo 8, orienta que as distorções individuais de tensão e os desequilíbrios de tensão sejam limitados aos valores apresentados na Tabela 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	Tensão Nominal $V_n \leq 1,0$ kV
DTT <sub>95%</sub>	10,0 %
DTT <sub>p95%</sub>	2,5 %
DTT <sub>195%</sub>	7,5%
DTT <sub>395%</sub>	6,5%

Tabela 2 – Limites para os desequilíbrios de tensão.

Indicador	Tensão Nominal $V_n \leq 1,0$ kV
FD <sub>95%</sub>	3,0 %

Em termos gerais, pode-se dizer que os harmônicos gerados por dispositivos conversores trifásicos, cujas ordens são resultantes da lei de formação  $6k \pm 1$ , para qualquer valor de  $k$  inteiro positivo, são denominados por “harmônicos característicos”, a exemplo dos de 5ª e 7ª ordem, tipicamente

encontrados nas redes elétricas. A origem dos harmônicos ditos “característicos” se trata de um assunto amplamente difundido na literatura [7] [8]. Contudo, o desenvolvimento da eletrônica de potência [9] [10], propiciou o surgimento de novas topologias de conversores, utilizando técnicas sofisticadas de controle em seu chaveamento estático e fazendo com que correntes de ordens harmônicas atípicas fossem notadas nas instalações. Tal conteúdo não característico, atrelasse à forma de comutação do chaveamento semicondutor, bem como das características construtivas destes, todavia, estudos relacionados a essa temática mostram-se atrativos em função da eminente necessidade de pesquisas correlatas.

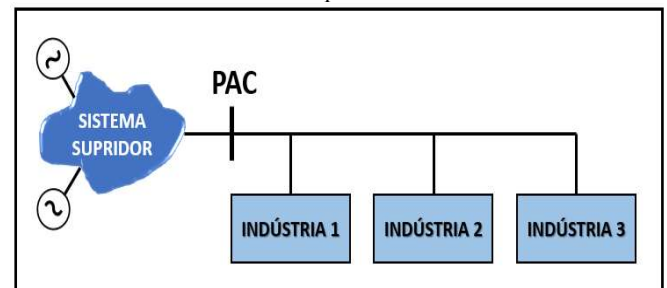
## III. PROTÓTIPO DE UM EQUIVALENTE INDUSTRIAL EM PEQUENA ESCALA

Nesta seção é apresentado o arranjo do protótipo industrial desenvolvido, bem como sua parametrização. Pontua-se que este consiste em um equivalente real, compostos por três complexos industriais em escala reduzida, alimentados por uma fonte controlada de tensão.

### A. Complexo Industrial – Síntese do Arranjo

Conforme esboça a Figura 1, o complexo industrial implementado é composto por três indústrias com características típicas de instalações reais, enquanto o sistema de alimentação é representado por uma fonte de tensão controlada. Salienta-se que todo protótipo foi dimensionado de forma a representar o carregamento característico de uma indústria, atentando-se para a presença de elementos com perfil linear e não linear, comumente empregados nos nichos fabris.

Figura 1: Disposição geral do protótipo industrial em pequena escala implementado.



Já nas Figuras 2 a 6 apresentam a fonte de suprimento e os complexos industriais desenvolvidos no LAQEE – UFU.

Figura 2: Fonte controlada de Tensão.



Figura 3: Arranjo implementado Indústria 1.

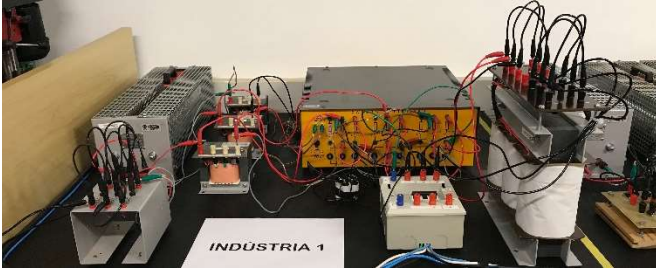


Figura 4: Arranjo implementado Indústria 2.

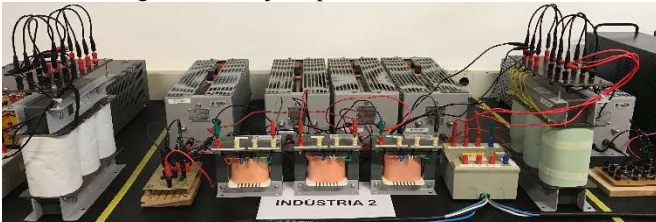


Figura 5: Arranjo implementado Indústria 3.

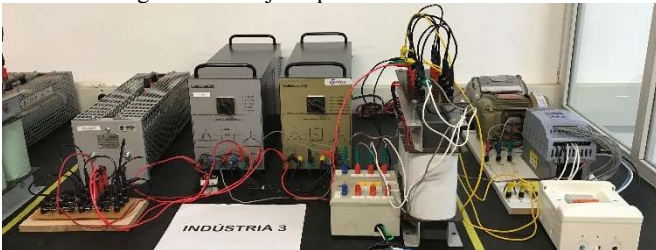


Figura 6: Arranjo contendo todo sistema industrial implementado.



### B. Parâmetros Sistema Supridor e das Indústrias 1, 2 e 3.

No arranjo desenvolvido, utilizou-se para representação do sistema supridor, uma fonte trifásica de tensão controlada, modelo *California Instruments CSW5550* da *Ametek Programmable Power*, composta por um módulo *Master* e outro *Slave*, esse dispositivo é capaz de simular situações adversas do sistema interligado nacional (SIN), como distúrbios envolvendo a degradação da QEE. Assim, a imposição das tensões com perfil pré distorcido (*background distortion*) e pré desequilibrado puderam ser tratadas de forma controlada. Na Tabela 3, tem-se a parametrização do sistema supridor utilizado nas análises.

Tabela 3 – Parâmetros do Sistema Supridor.

Parâmetro	Valor
Tensão de suprimento (V)	220∠0°
Frequência (Hz)	60
Potência de curto-circuito (kVA)	47,86
$R_s$ ( $\Omega$ )	0,13
$L_s$ (mH)	2,66

No que concerne aos circuitos das indústrias, estes foram concebidos de forma a representar um arranjo em pequena escala contendo elementos lineares e não lineares. É oportuno salientar que as cargas lineares dotadas de núcleo magnético, quais sejam, transformadores, indutores e motores de indução, não estão operando em regime de saturação. Logo, em condições ideais, tais elementos não são potenciais geradores de correntes em frequências harmônicas múltiplas da fundamental.

Nota-se nas Figuras 7 a 9 a disposição do carregamento de cada indústria, bem como a parametrização utilizada, tal como exposto nas Tabelas 4 a 6. É importante ressaltar, que os circuitos industriais tratados na sequência, correspondem a arranjos do protótipo industrial trifásico implementado.

Figura 7: Arranjo unifilar – Indústria 1.

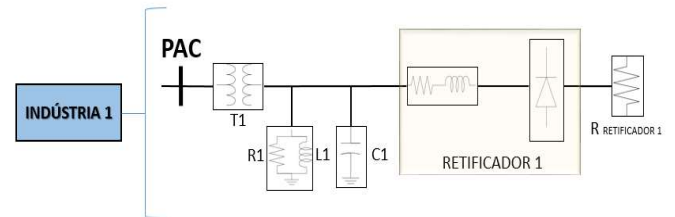


Figura 8: Arranjo unifilar – Indústria 2.

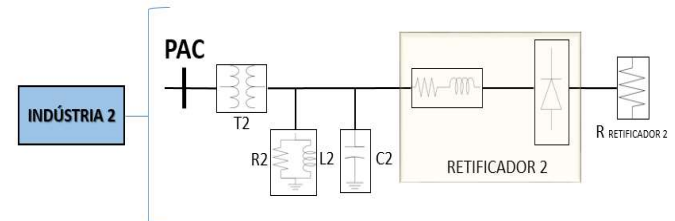
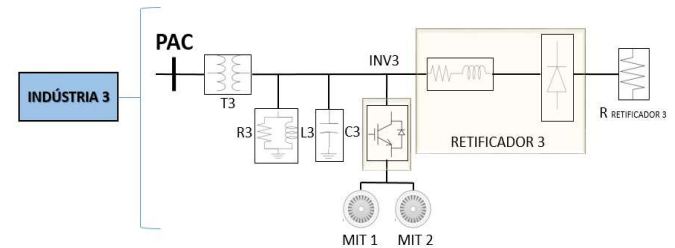


Figura 9: Arranjo unifilar – Indústria 3.



Parametrização dos transformadores presentes nas entradas das indústrias:

Tabela 4 – Parâmetros dos Transformadores de Interfaceamento com o Sistema Supridor.

Parâmetro	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
Potência nominal (kVA)	3	3	3
Resistência percentual (%)	3,3%	3,3%	3,3%
Reatância percentual (%)	0,6%	0,6%	0,6%
Tipo de ligação	$\Delta$ - $\Delta$	$\Delta$ - $\Delta$	$\Delta$ - $\Delta$
Tensão (V)	220/220	220/220	220/220

Parametrização dos componentes dos circuitos associados às indústrias:

Tabela 5 – Parametrização Indústrias.

Parâmetro	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
Resistência ( $\Omega$ )	276,56	70	180
Indutância (mH)	325	232	320
Capacitância ( $\mu$ F)	8	12	4
Resistência Retificador ( $\Omega$ )	170	260	175
Motor 1 (CV)	---	---	0,33
Motor 2 (CV)	---	---	1,5

Nota: Impedâncias referidas para a tensão de 220 V

Potências consumidas pelas indústrias:

Tabela 6 – Potência consumidas pelas indústrias.

Parâmetro	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
Potência Ativa (W)	719	1165	1056
Potência Reativa (var)	252	399	345
Potência Aparente (VA)	780	1239	1163
Fator de Potência	0,92	0,94	0,91

### C. Dispositivos de medição utilizados.

No processo experimental utilizou-se de analisadores de qualidade da energia *Fluke*, modelo 435, série II (Figura 10). Este modelo de equipamento satisfaz os requisitos de desempenho da norma IEC 61000-4-30 que o permite ser caracterizado como um instrumento classe A. Tal analisador possibilita a obtenção de um completo conjunto de informações correlatas às formas de onda e fasores de tensões e correntes harmônicas, alicerçando assim, os dados mensurados neste trabalho [11].

Figura 10: Analisador de qualidade da energia e potência - Fluke 435série II.



## IV. ESTUDOS DE CASOS

A partir do protótipo experimental implementado, realizar-se-á quatro estudos de caso distintos, tendo por objetivo analisar a geração de correntes harmônicas não tipicamente encontradas no PAC, os chamados harmônicos não característicos ora tratados neste trabalho. Salienta-se que os níveis de *background distortion* e *background imbalance*, abaixo citados, são correspondentes à uma condição de fornecimento de tensão pré-existente no PAC entre sistema supridor e as indústrias.

### A. Caso 1 – Rede senoidal e equilibrada.

Neste primeiro momento uma tensão perfeitamente senoidal, ou seja, *background distortion* e *background imbalance* nulos, foi fornecida pelo sistema supridor ao complexo industrial, tendo por meta analisar as correntes harmônicas não características geradas pelo complexo industrial e medidas no PAC.

### B. Caso 2 – Rede distorcida e equilibrada.

Nesta etapa, impôs-se um nível de *background distortion* na tensão fornecida pelo sistema supridor. Ressalta-se, que tal distorção é imposta somente às ordens de frequências harmônicas características, ou seja, condizentes com a lei de formação  $6k \pm 1$ . Ademais, os percentuais arbitrados são condizentes com os comumente manifestados no ponto de acoplamento de instalações reais em baixa tensão. A Tabela 7, denota o percentual imposto em relação a componente fundamental de tensão e as respectivas ordens harmônicas tratadas.

Tabela 7 – Distorção de tensão.

Ordem Harmônica	Percentual da Fundamental
5ª	7,5 %
7ª	6,0 %
11ª	4,8%
13ª	3,8%

Nota: Valores correspondentes a distorção individual de tensão (DIT).

### C. Caso 3 – Rede senoidal e desequilibrada.

Similarmente ao caso anterior, uma perturbação ao sinal de tensão é imposta, contudo, trata-se agora da inserção de um nível de *background imbalance* diferente de zero, fazendo com que as indústrias operem com um sinal de tensão pré desequilibrado, muito embora senoidal. Na Tabela 8 tem-se a magnitude e ângulo das tensões de cada fase, parametrizado na fonte trifásica controlada, para obtenção de um nível de desequilíbrio de 3%, cujo valor se apresenta como o máximo percentual de assimetria indicado pelo PRODIST.

Tabela 8 – Tensões impostas pela fonte controlada – FD = 3%

Fases	Tensões
A	130,81 $\angle$ 0°
B	125,139 $\angle$ – 121,511°
C	125,139 $\angle$ 121,511°

### D. Caso 4 – Rede distorcida e desequilibrada.

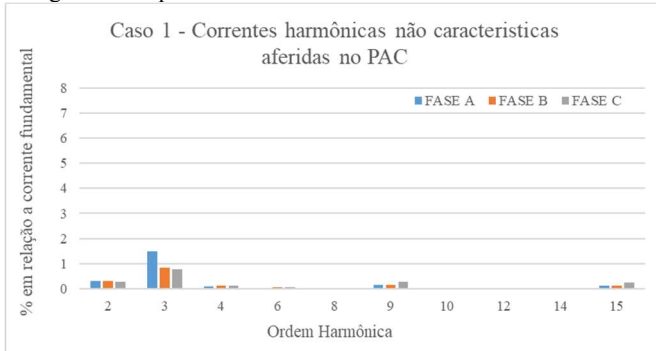
Por fim, neste último caso, foram mantidos os níveis de *background distortion* e *background imbalance* tratados nos casos, no entanto, sendo abordados de forma simultânea.

## V. RESULTADOS

Com a execução dos ensaios, tendo como base os estudos de casos descritos anteriormente, uma síntese dos harmônicos não característicos de corrente, aferidos no PAC, gerados pela operação do protótipo industrial em condições distintas, é exposta nas Figuras 11 a 14. Nesse certame, foi analisado o percentual individual, em relação à componente fundamental, das harmônicas de corrente não características, quais sejam, 3ª, 4ª, 6ª, 8ª, 9ª, 10ª, 12ª, 14ª e 15ª ordens.

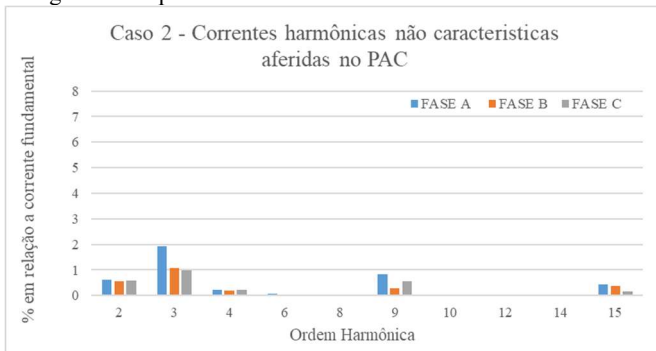
### A. Caso 1 – Rede senoidal e equilibrada.

Figura 11: Espectro harmônico das correntes no PAC – Caso 1.



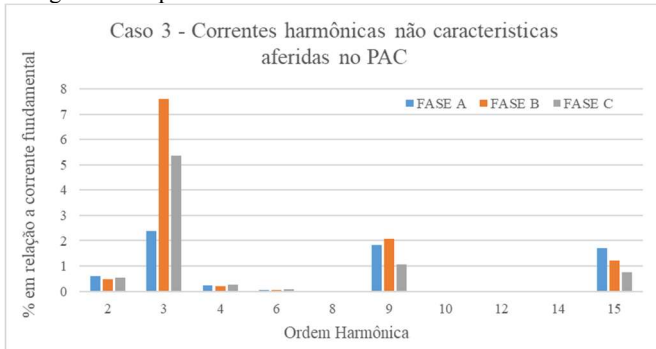
### B. Caso 2 – Rede distorcida e equilibrada.

Figura 12: Espectro harmônico das correntes no PAC – Caso 2.



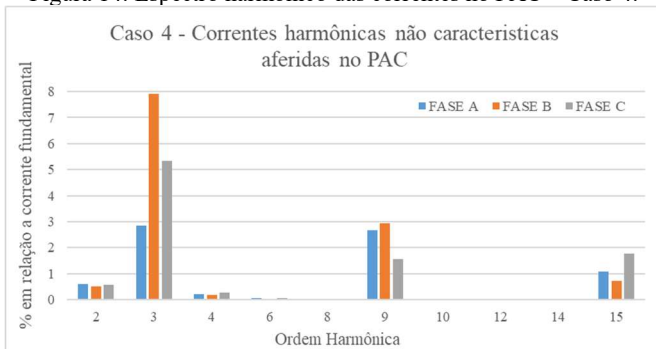
### C. Caso 3 – Rede senoidal e desequilibrada.

Figura 13: Espectro harmônico das correntes no PAC – Caso 3.



### D. Caso 4 – Rede distorcida e desequilibrada.

Figura 14: Espectro harmônico das correntes no PAC – Caso 4.



Na seção que segue, tratar-se-á das análises e discussões envolvendo os resultados obtidos nos estudos de casos.

## VI. DISCUSSÕES ACERCA DOS RESULTADOS ENCONTRADOS

Abaixo são expostas as análises e pontuações quanto aos resultados advindos dos ensaios realizados neste trabalho:

- Caso 1 – Quando submetido a uma alimentação perfeitamente senoidal e equilibrada (*background distortion* e *background imbalance* igual a zero), percebe-se que os níveis das harmônicas não características possuem valores baixos em relação à componente de corrente fundamental. Tal resultado mostra-se fisicamente coerente, haja vista, que se trata de um fornecimento ideal de tensão. Observa-se, no entanto, que apesar dos baixos percentuais, a 3ª ordem harmônica de corrente é superior a 1% da fundamental na Fase A. Tal fato, denota um pequeno percentual de desequilíbrio o qual pode ser atribuído às assimetrias das impedâncias dos elementos trifásicos presentes nas indústrias, a exemplo dos transformadores, cabos de conexão, etc. Assim, as harmônicas ímpares múltiplas de 3 podem ser notadas no PAC, mesmo em condição de suprimento perfeitamente senoidal.
- Caso 2 – Ao fornecer um sinal de tensão com um nível considerável de distorção, ressalta-se que o *background distortion* mencionado corresponde aos conteúdos individuais nas harmônicas características (5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordens). Nota-se um pequeno aumento percentual das harmônicas manifestadas no primeiro caso, no entanto, de pouco impacto em uma avaliação global. Cabe salientar, que ao operar em um nível maior de distorção de tensão, as harmônicas ímpares múltiplas de 3 (3ª, 9ª e 15ª ordens), foram as que apresentaram um maior percentual de aumento.
- Caso 03 – No que tange a operação sobre um perfil pré desequilibrado (*background imbalance* diferente de zero), os resultados demonstram um aumento significativo da 3ª ordem, bem como da 9ª e 15ª, tal como esperado, devido ao suprimento desequilibrado pré-estabelecido. As demais componentes não características não tiveram acentuações ou atenuações consideráveis.
- Caso 04 – Observou-se, neste caso, que a planta industrial, ao ser suprida, simultaneamente, com um nível de *background distortion* e *background imbalance*, acarretou novamente em um aumento percentual nas harmônicas de 3ª ordem e múltiplas. É importante pontuar que, com exceção das componentes múltiplas de 3, tal operação industrial em um perfil desbalanceado de tensão pode provocar o incremento ou decréscimo das harmônicas presentes no PAC, com íntima ligação e dependência, do ângulo de defasagem entre as componentes de sequência, geradas pelo

desequilíbrio do sistema, para uma dada ordem harmônica.

## VII. CONCLUSÕES

Abordando o contexto da operação industrial em condições adversas de suprimento, quais sejam, conteúdos de *background distortion* e *background imbalance*, no que tange, ao suprimento de tensão à planta industrial, utilizando de um protótipo experimental em escala reduzida, o presente trabalho teve por objetivo, avaliar e analisar o surgimento dos harmônicos comumente não manifestados no sistema, denominados por harmônicos não característicos.

Nesse contexto, a partir da operação do protótipo industrial concebido, contendo o sistema supridor representado por uma fonte trifásica controlada de tensão, alimentando três industriais com características de carregamento linear e não linear, partiu-se aos estudos propostos, com o intuito de ilustrar uma situação de funcionamento representativa do sistema real, haja vista a crescente preocupação com a QEE e o funcionamento ideal do sistema elétrico interligado.

Analisando os resultados, fica claro que o suprimento em condições não ideais, intensifica o surgimento do conteúdo harmônico ora tratado. Cabe salientar que, apesar da manifestação individual para algumas ordens serem relativamente baixos, os resultados deixam claro que o carregamento industrial operando em condições adversas é um potencial gerador de conteúdo harmônico dito não característico, demandando, assim, especial atenção para tal situação, bem como estudos atrelados à temática para uma maior caracterização e influência destes harmônicos na rede elétrica.

No que concerne, as ordens correspondentes aos harmônicos ímpares múltiplos de 3, notou-se expressivos valores percentuais, sobremaneira, na 3ª, 9ª e 15ª ordens. Tal resultado está fisicamente coerente, tendo em vista a presença de assimetrias no carregamento industrial, bem como em função da imposição do *background imbalance* pela fonte controlada.

A luz dessas constatações, estudos complementares se fazem necessários a fim de denotar a real interação entre magnitude e ângulos das componentes de sequência geradas pelo desequilíbrio do supridor e consumidor, com intuito de alicerçar o comportamento das correntes harmônicas não características geradas no ponto de acoplamento comum entre os agentes.

## AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao suporte financeiro concedido pelo CNPq, FAPEMIG e Grupo NEOENERGIA.

## REFERÊNCIAS

- [1] Phipps, Nelson e Sen, "Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems," em *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol 30, nº 2, March/April - 1994, pp. 476-485.
- [2] M. H. Bolen, *Overview of Power Quality and Power Quality Standards*, Wiley-IEEE Press, 2000.
- [3] J. Arrilaga e N. R. Watson, "Effects of Harmonic Distortion," em *Power System Harmonics*, 2003, pp. 143 - 187.
- [4] S. M. Deckmann e J. A. Pomilio, "Distorção harmônica: causas, efeitos, soluções e normas," Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP, 17 Janeiro 2017. [Online]. Available: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a5.pdf>. [Acesso em 30 Julho 2018].
- [5] "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica," Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2017, Rev. 10.
- [6] V. Kus, Z. Peroutka e P. DRABEK, "Non-Characteristic Harmonics and Interharmonics of Power Electronic Converters. 18th International Conference on Electricity Distribution," em *18 th International Conference on Electricity Distribution*, 2005, n. 525.
- [7] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso e H. W. Beaty, em *Electrical Power Systems Quality*, 2002.
- [8] J. Arrillaga e N. R. Watson, em *Power System Harmonics*, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, John Wiley & Sons, 2004.
- [9] I. Barbi, Projeto de Fontes Chaveadas, 3ª Edição.
- [10] I. Barbi, *Eletrônica de Potência*, 7ª Edição.
- [11] F. Corporation, "Analisador de energia e potência Fluke 435 série II," Fluke, [Online]. Available: <https://www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/os-analísadores-de-qualidade-de-energia/analísadores-da-qualidade-da-energia-trifásica/fluke-435-series-ii>. [Acesso em 03 08 2018].
- [12] "Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes," Operador Nacional do Sistema - ONS - Submódulo 2.8, Rev. 0.3, 2008.
- [13] "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," Operador Nacional do Sistema - ONS, NT 009/2016 - Rev. 02.
- [14] C. Nascimento, E. Watanabe e a. et, "Analysis of Noncharacteristic Harmonics Generated by Voltage-Source Converters Operating Under Unbalanced Voltage," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, nº 2, pp. 951 - 961, April 2017.