



PLATAFORMA LABORATORIAL PARA TESTES E ANÁLISES DE PARÂMETROS RELACIONADOS À QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

P.H.D. Faquim*¹, I. N. Santos¹, A. C. Souza¹, A. C. Santos¹, C. R. Azevedo Jr¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo – O atual trabalho possui como finalidade a apresentação de uma plataforma laboratorial para testes e análises de parâmetros relacionados à qualidade da energia elétrica. Este arranjo laboratorial é composto pelo equivalente elétrico, em proporção reduzida, de três indústrias contendo cargas trifásicas lineares e não lineares. Com o objetivo de se testar a funcionalidade desta plataforma, neste artigo, serão realizadas análises com foco nas distorções harmônicas de tensão e corrente nos pontos de conexão das indústrias. Estudos adicionais com a imposição de distorções harmônicas advindas da rede de conexão também serão implementados e avaliadas.

Palavras-Chave – arranjo em proporção reduzida, distorção harmônica, plataforma laboratorial, qualidade da energia.

LABORATORIAL PLATFORM FOR TESTS AND ANALYSIS OF PARAMETERS RELATED TO THE QUALITY OF ELECTRIC POWER

Abstract – The current work has the objective to present the laboratorial platform for tests and analysis of parameters related to the quality of electric power. This laboratory arrangement is composed by the reduced electrical equivalent of three industries containing linear and nonlinear three-phase loads. In order to test the functionality of this platform, in this article, analyzes will be conducted focusing on harmonic distortions of voltage and current at the connection points of industries. Further studies with the imposition of harmonic distortions coming from the connection network will also be implemented and evaluated.

Keywords - harmonic current, voltage distortion.

I. INTRODUÇÃO

O termo Qualidade da Energia Elétrica (QEE) inclui uma gama de fenômenos, abrangendo áreas de interesse de sistemas da energia elétrica até problemas relacionados com a comunicação em redes de transmissão de dados [1]. Dessa forma, devem ser divulgados e reconhecidos por todos os setores envolvidos com o consumo, transmissão e geração de energia elétrica. A interpretação destes fenômenos,

principalmente as distorções de tensões e correntes, localizadas tanto nos PACs (ponto de acoplamento comum) como também dentro das instalações dos próprios consumidores de energia, está associada diretamente à correção do fator de potência e ao aumento da eficiência da energia elétrica. A ocorrência destes problemas determina a necessidade de uma busca de soluções para a realização de medidas práticas e econômicas.

Pensando nisso, foi desenvolvida no laboratório uma plataforma para testes e análises de parâmetros relacionados à Qualidade de Energia Elétrica, sendo elas, as distorções harmônicas de tensão e corrente, VTCD (Variação de Tensão de Curta Duração), VTLD (Variação de Tensão de Longa Duração), fator de potência e flutuação de tensão. O sistema utilizado é constituído basicamente por um arranjo supridor responsável por alimentar três distintas unidades consumidoras industriais ligadas a um mesmo barramento.

Pode-se considerar que o arranjo supridor é representado a partir de um circuito equivalente de Thévenin constituído por uma fonte de tensão trifásica, perfeitamente senoidal, em série com uma impedância responsável por definir o nível de curto-circuito da configuração. Este arranjo possui R_s e L_s que representam, respectivamente, a resistência e a indutância do circuito supridor. A Tabela I exhibe a parametrização dos elementos desta parte do circuito.

Tabela 1: Parametrização dos elementos do circuito associado ao sistema supridor – sistema laboratorial.

Parâmetros	Valor
Tensão de suprimento (V)	220
Frequência (Hz)	60
Potência de curto-circuito (kVA)	47,86282,61°
R_s (Ω)	0,13
L_s (mH)	2,66

As cargas consumidoras são modeladas de maneira a abranger a representação de indústrias, com transformadores de entrada alimentando elementos lineares resistivos, indutivos e capacitivos, que podem indicar a existência de cabos, aquecedores, motores, bancos de capacitores para correção do fator de potência, entre outros. Além disso, as indústrias possuem também cargas não lineares, indicando, por exemplo, a existência de retificadores e elementos de controle eletrônico.

Para garantir o fornecimento de tensão totalmente desprovida de distorções, foi utilizada uma fonte trifásica

controlada da marca California Instruments, modelo CSW5550 [2]. Para os ensaios relatados neste trabalho foram utilizados os examinadores de qualidade da energia da marca Fluke, modelo 435, série II [3].

Conforme dissertado, a plataforma implementada em questão, possui capacidade para representação dos diferentes fenômenos estudados no contexto da QEE [8][9][10][11]. Conquanto, devido a massiva e constante inserção de dispositivos com características não lineares no site fabril, sobremaneira, advindos dos conversores chaveados, denotados por conversores com chaves semicondutoras em sua topologia [13], elementos estes, capazes de injetar correntes de frequências harmônicas múltiplas da fundamental (60 Hz), perfaz com que o fenômeno das distorções de tensão e/ou corrente, seja aquele de maior importância, haja vista o perfil degradante que este possui [12].

Nesse iterim, o presente trabalho tem por objetivo avaliar um dos principais nichos relacionados à QEE, qual seja, a problemática das distorções harmônicas no que tange a carregamentos tipicamente lineares e não lineares de um complexo industrial de pequena escala, com atenção às condições do sistema supridor quando a sua alimentação é não senoidal.

II. CARACTERIZAÇÃO E INDICADORES ATRELADOS ÀS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Conforme dissertado na seção introdutória, estudos que permeiem a temática das distorções harmônicas em nichos fabris, mostram-se necessários devido ao alto incremento de dispositivos não lineares, sobremaneira, conversores eletrônicos que viabilizam a automação, processos e modernização das plantas industriais.

Por certo, é sabido, que as distorções harmônicas se caracterizam pela degradação dos sinais de corrente e tensão, devido ao incremento de múltiplos inteiros da fundamental, as quais, deterioram o perfil senoidal desejado de tais variáveis [8].

Com o objetivo de controlar os impactos produzidos na rede elétrica no Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é responsável por normatizar os indicadores de conformidade, no que se refere a QEE, para os acessantes ao sistema de distribuição. Tais procedimentos são estipulados no Módulo 8 do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST) [4]. Já ao Operador Nacional do Sistema (ONS), compete as devidas regulamentações quanto ao sistema de transmissão, caracterizada pela Nota Técnica NT 009/2016 [5], e também por meio do Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede [6]. Os estudos neste trabalho seguem as normativas do PRODIST, as quais, para distúrbios de distorção harmônica de tensão, estabelecem os seguintes limites globais, conforme exemplifica a Tabela 2.

Tabela 2 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	Tensão Nominal $V_n \leq 1,0$ kV
DTT _{95%}	10,0 %
DTT _{p95%}	2,5 %
DTT _{195%}	7,5%
DTT _{395%}	6,5%

É fundamental ressaltar que a operação do carregamento industrial em condições não senoidais, na existência de níveis de background distortion (tensão previamente distorcida no PAC), depende de suas configurações e topologias, para gerar harmônicos que não são tipicamente manifestados nas instalações [7].

III. PROTÓTIPO DE UM EQUIVALENTE INDUSTRIAL EM ESCALA REDUZIDA

Nesta parte é mostrado o protótipo do modelo industrial elaborado, bem como sua parametrização. Pontua-se que, este representa um equivalente real, composto por três indústrias em proporção reduzida, alimentados por uma fonte controlada de tensão. Após a montagem e configuração da planta experimental, procedeu-se aos estudos de casos, tratados na seção IV.

A. Complexo Industrial – Síntese do Arranjo

Como indica a Figura 1, o conjunto industrial elaborado é formado por três indústrias e por um sistema de alimentação que atende suas respectivas demandas de energia elétrica. Salienta-se que, o modelo foi totalmente dimensionado de maneira a demonstrar o carregamento característico de uma indústria, atentando-se para a existência de elementos com caráter linear e não linear, geralmente empregados nos ambientes industriais. Estes elementos não lineares são os responsáveis pela injeção de harmônicos na rede a partir das indústrias, como exibido na Figura 1.

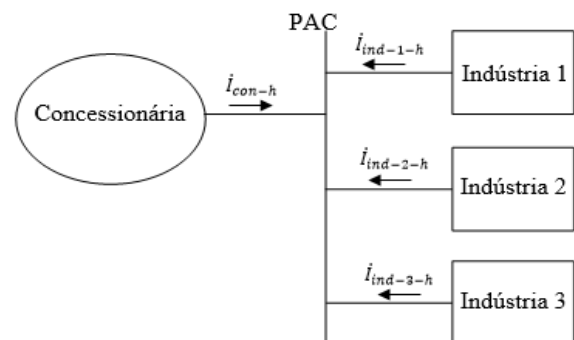


Fig. 1. Esquema do protótipo industrial em pequena escala utilizado na plataforma laboratorial.

Nesta figura, i_{con-h} indica a corrente de ordem harmônica h que flui da concessionária para o PAC, enquanto $i_{ind-1-h}$, $i_{ind-2-h}$ e $i_{ind-3-h}$ representam as correntes de ordem harmônica h nas entradas das indústrias 1, 2 e 3, respectivamente, com sentido da indústria para o PAC.

Nas Figuras 2 a 6, tem-se o sistema propriamente dito, empregado no Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica (LAQEE) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).



Fig. 2. Fonte controlada de Tensão.

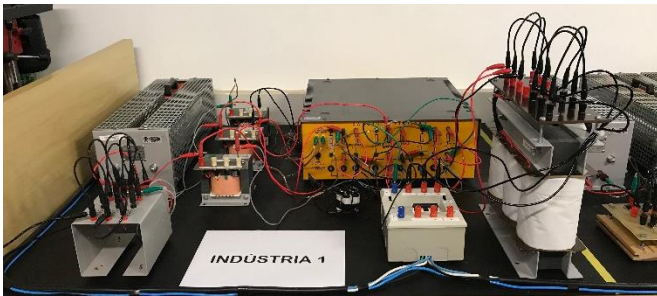


Fig. 3. Arranjo Indústria 1.



Fig. 4. Arranjo Indústria 2.



Fig. 5. Arranjo Indústria 3.



Fig. 6. Arranjo de todo sistema industrial.

B. Sistema Supridor.

O sistema supridor é representado por uma fonte trifásica de tensão controlada, modelo California Instruments CSW5550 da Ametek Programmable Power, formada por um módulo Master e outro Slave. Este produto tem a capacidade de reproduzir situações de adversidade do

sistema interligado nacional (SIN), como perturbações envolvendo a degradação da QEE, distorções harmônicas de tensão, desequilíbrios, afundamentos e elevação de tensão, dentre outros. O seu uso proporciona evidenciar aspectos realísticos aos testes e análises a serem feitos por esta plataforma laboratorial. Condições de adversidade de background distortion e outros fenômenos, podem ser tratados de maneira controlada. A Figura 7 evidencia o modelo do circuito supridor.

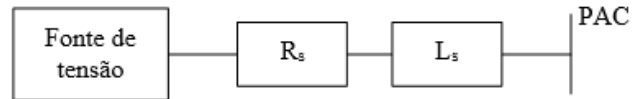


Fig. 7. Partes constituintes do sistema elétrico representativo do supridor.

C. Indústrias 1, 2 e 3.

Os circuitos das indústrias foram planejados com o objetivo de representar um arranjo em proporção reduzida, sendo formado por elementos lineares e não lineares. Ressalta-se que as cargas lineares dotadas de núcleo magnético, como transformadores e indutores, não estão atuando em regime de saturação. Assim, em condições ideais, estes elementos não geram correntes harmônicas.

A Figura 8 exibe a configuração usada para a representação dos complexos industriais nas simulações, em que, T_{ind} indica o transformador de entrada, e R_{ind} , L_{ind} e C_{ind} representam, respectivamente, a resistência, indutância e capacitância equivalentes da instalação. Em relação as cargas não lineares, optou-se por utilizar retificadores que alimentam cargas resistivas (R_{ret}). Estes parâmetros, bem como as informações relacionadas às cargas não lineares de cada unidade consumidora, são detalhados nas Tabelas 4 e 5.

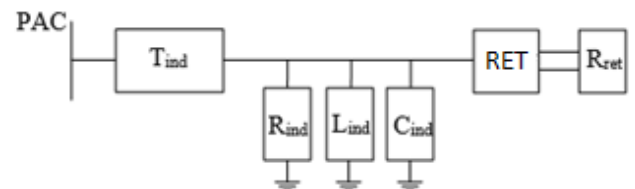


Fig. 8. Partes constituintes dos sistemas representativos das indústrias.

Tabela 4 – Parametrização dos transformadores presentes nas entradas das indústrias – sistema laboratorial.

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 primário/Tensão secundário (V)	220/220	220/220	220/220

Tabela 5 – Parametrização dos componentes dos circuitos associados às indústrias – sistema laboratorial.

Parâmetro	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
R_{ind} (Ω)	276,56	70	180
L_{ind} (mH)	325	232	320
C_{ind} (μ F)	8	12	4
R_{rec} (Ω)	170	261	178

Na tabela 6 temos os valores para as potências consumidas por cada uma das três indústrias.

Tabela 6 – Potências consumidas pelas indústrias – sistema laboratorial.

Parâmetro	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
Potência Ativa (W)	714	1161	792
Potência Reativa (VAr)	298,8	415,17	352,74
Potência Aparente (VA)	774	1233	867
Fator de Potência	0,92	0,94	0,91

D. Equipamentos de aferição utilizados.

Durante o procedimento experimental, analisadores de qualidade da energia da marca Fluke, modelo 435, série II, foram usados – como ilustra a Figura 9. Este equipamento cumpre as exigências de desempenho da norma IEC 61000-4-30. Por conta disso, ele pode ser considerado como um instrumento classe A. Esta ferramenta permite a obtenção de um amplo grupo de informações correlatas a formas de onda e fasores de tensões e correntes harmônicas, consolidando, assim, os dados avaliados neste trabalho.



Fig. 9. Analisador de qualidade da energia e potência Fluke 435 série II.

IV. ESTUDOS DE CASOS

A começar pelo arranjo experimental implementado, dois estudos de caso diferentes serão realizados, com o objetivo de avaliar a geração de correntes harmônicas no PAC. É importante ressaltar que os níveis de background distortion, que serão citados a seguir, se equivalem à uma situação de fornecimento de tensão pré-existente no PAC entre sistema supridor e indústrias.

A. Caso 1 – Background distortion igual a zero.

Neste caso, uma tensão perfeitamente senoidal, em outras palavras, background distortion nulo, foi fornecida pelo sistema supridor ao complexo industrial, a fim de avaliar as tensões harmônicas geradas pelo complexo industrial.

B. Caso 2 – Background distortion diferente de zero.

Já neste caso, um nível de background distortion foi imposto na tensão fornecida pelo sistema supridor, sendo que a mesma será composta pelas ordens harmônicas de 2ª até a 19ª com 5% de distorção cada em relação a fundamental. A Figura 10 ilustra a forma de onda da tensão distorcida descrita.

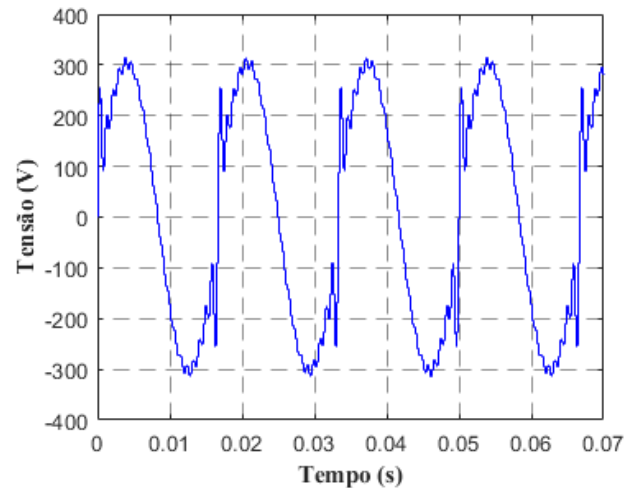


Fig. 10. Tensão distorcida fornecida pela fonte.

V. RESULTADOS

Com a realização dos ensaios, considerando os estudos de casos descritos anteriormente, uma síntese dos harmônicos de corrente estabelecidos no PAC, produzidos pelo funcionamento do protótipo industrial em diferentes condições, é exposta nas Figuras 10 a 15. Para cada um dos casos, foram realizadas medições nas entradas de cada uma das indústrias. Nesse cenário, analisar-se-á o percentual individual, em relação à componente fundamental, das harmônicas de corrente de 2ª até a 19ª ordens.

A. Caso 1 – Background distortion igual a zero

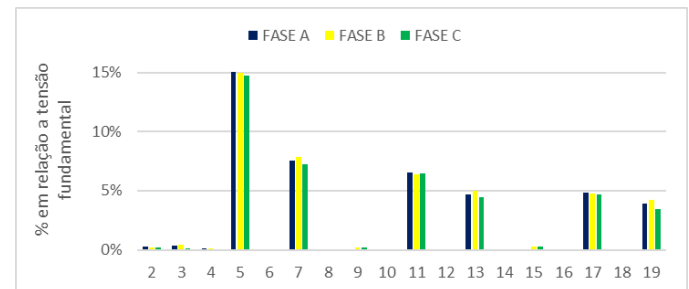


Fig. 11. Espectro harmônico de correntes na entrada da indústria 1 – Caso 1.

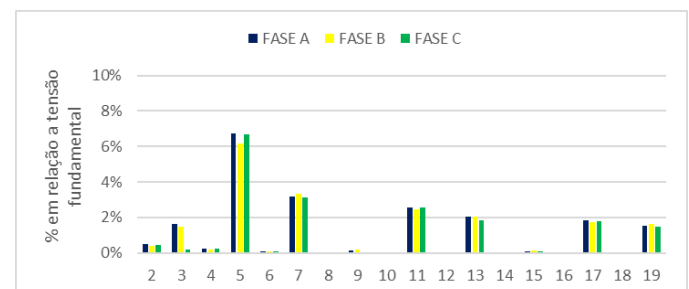


Fig. 12. Espectro harmônico de correntes na entrada da indústria 2 – Caso 1.

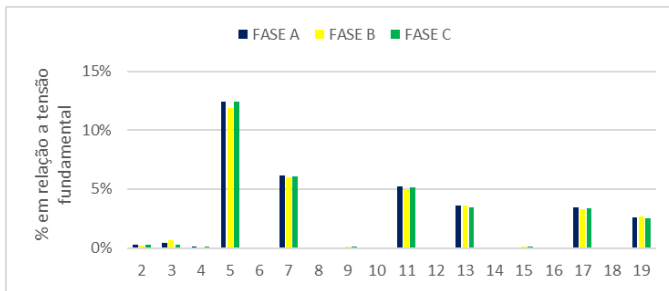


Fig. 13. Espectro harmônico de correntes na entrada da indústria 3 – Caso 1.

B. Caso 1 – Background distortion diferente de zero

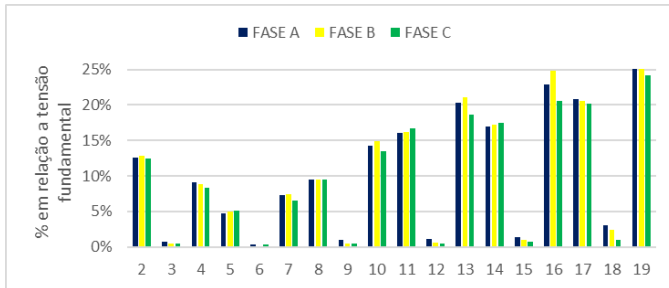


Fig. 14. Espectro harmônico de correntes na entrada da indústria 1 – Caso 2.

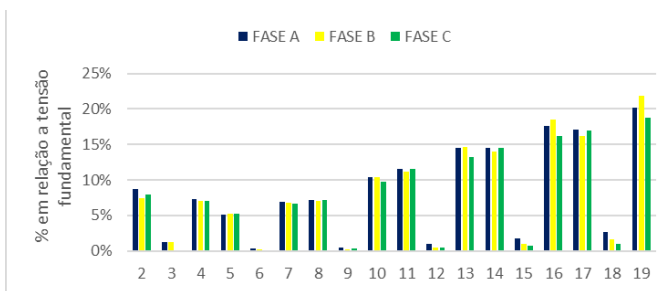


Fig. 15. Espectro harmônico de correntes na entrada da indústria 2 – Caso 2.

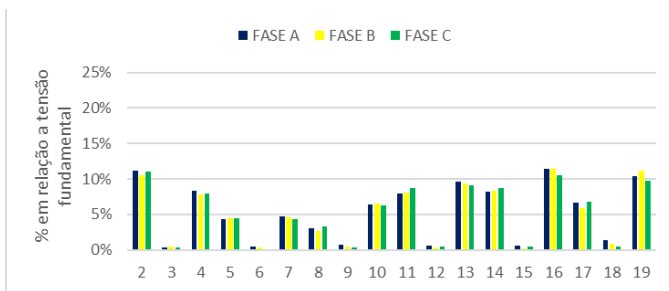


Fig. 16. Espectro harmônico de correntes na entrada da indústria 3 – Caso 2.

Na seção a seguir, temos as discussões sobre os resultados encontrados.

VI. DISCUSSÕES ACERCA DOS RESULTADOS ENCONTRADOS

Abaixo são apresentadas as análises e pontuações relacionadas aos resultados provenientes dos ensaios feitos neste trabalho:

- Caso 1 – Ao submeter o arranjo industrial a uma alimentação perfeitamente senoidal (background

distortion igual a zero), verifica-se que os níveis de percentuais das harmônicas em relação à componente de corrente fundamental são consideráveis. Apesar de se tratar de um suprimento limpo de tensão, por ser um arranjo com atributos de carregamento linear e não linear, podemos afirmar que as três indústrias são potenciais geradoras de conteúdo harmônico.

- Caso 2 – Ao gerar um sinal de tensão com um nível relevante de distorção, constata-se um aumento percentual das harmônicas de corrente manifestadas no caso anterior. O aumento é maior nas indústrias 1 e 2 pelo fato de serem arranjos com características predominantemente capacitivas, diante disso, as amplitudes aumentam com o aumento da frequência. Enquanto a indústria 3, predomina-se característica indutiva. Nestas indústrias (1 e 2), com o aumento da frequência, a reatância capacitiva diminui e isso provoca a elevação da corrente. Os transformadores nas entradas das indústrias isolam as correntes de 3ª ordem harmônica e suas múltiplas. Por se tratarem de correntes harmônicas de sequência zero, elas ficam circulando no delta.

VII. CONCLUSÕES

O trabalho atual buscou apresentar, por meio de estudos relacionados às distorções harmônicas, a plataforma laboratorial elaborada para a execução de testes e análise de parâmetros relacionados à Qualidade de Energia Elétrica.

Iniciando-se pela atuação do protótipo industrial criado, sendo o sistema supridor representado por uma fonte trifásica controlada de tensão alimentando três indústrias com atributos de carregamento linear e não linear, partiu-se para os estudos sugeridos com a ideia de elucidar um cenário de funcionamento representativo do sistema real, em conformidade com o gradativo cuidado com a QEE e o desempenho ideal do sistema elétrico interligado.

Refletindo sobre os resultados encontrados, fica evidente que o funcionamento em condições não senoidais reforça o surgimento do conteúdo harmônico. É possível observar ainda que o carregamento industrial atuando em condições adversas também é um eventual produtor de correntes harmônicas. Tal situação demanda atenção especial, além de estudos para melhor caracterização da atuação destes harmônicos na rede elétrica.

REFERÊNCIAS

- [1] O Setor Elétrico, “Qualidade de Energia” [Online]. Disponível em: http://www.oseletrico.com.br/wpcontent/uploads/2013/02/Ed84_fasc_qualidade_energia_cap1.pdf [Acesso em 10 Janeiro 2019]. J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.
- [2] California Instruments – Metek Programmable Power, “CSW Series AC Power Source User Manual” [Online]. Disponível em: <http://www.programmablepower.com/acpowersource/>

CSW/downloads/CSW_Series_USER_Manual_M162_084-01_rU.pdf. [Acesso em 07 Janeiro 2019]. K. Elissa, "Title of paper if known," unpublished.

- [3] F. Corporation, "Analisador de energia e potência Fluke 435 série II," Fluke, [Online]. Disponível em: <https://www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/os-analisadores-de-qualidade-de-energia/analísadores-da-qualidade-da-energia-trifásica/fluke-435-series-ii>. [Acesso em 08 Janeiro 2019]. Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, "Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface," IEEE Transl. J. Magn. Japan, vol. 2, pp. 740–741, August 1987 [Digests 9th Annual Conf. Magnetism Japan, p. 301, 1982].
- [4] "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.
- [5] "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.
- [6] "Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes," Operador Nacional do Sistema - ONS - Submódulo 2.8, Rev. 0.3, 2008.
- [7] C. R. Azevedo Jr, R. C. F. Gregory, I. N. Santos, G. S. Troncha e A. C. Souza, "Análise Experimental acerca dos Harmônicos não Característicos em um Equivalente Industrial", Faculdade de Engenharia Elétrica – UFU, Novembro de 2018. [Online]. Disponível em: https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/artigos/artigo_o_301.pdf [Acesso em 11 Janeiro 2019].
- [8] Jos Arrilaga; Neville R. Watson, Power System Harmonics, USA, Second edition: John Wiley, 2004.
- [9] Jos Arrilaga; Bruce C Smith; Neville R Watson; Alan R Wood, Power System Harmonic Analysis, England: John Wiley & Sons, 2000.
- [10] Roger C. Dugan; Mark F MacGranaghan; Surya Santoso, H. Wayne Beaty, Electrical Power Systems Quality, Second Edition: McGraw Hill, 2002.
- [11] Math H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems - Voltage Sags and Interruptions, IEEE , 2000.
- [12] S. M. Deckmann; J. A. Pomílio, "Distorção Harmônica: Causas, Efeitos, Soluções e Normas," UNICAMP, Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
- [13] Eric Monmasson, "Power Electronic Converters: PWM strategies and current control techniques", 2011, WILEY.