

Análise das Distorções Harmônicas Geradas pelas Cargas não-lineares através do Aplicativo Computacional PQA

Arthur Costa de Souza, Carlos Eduardo Tavares

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia/MG, Brasil

E-mail: arthur_costasouza@hotmail.com, cetavares@eel.ufu.br.

Resumo —Este artigo destaca a importância de analisar as perturbações ocorridas na rede elétrica devido à circulação das correntes harmônicas, pois a utilização de equipamentos eletrônicos passou a crescer de forma intensa nas instalações residenciais, comerciais e industriais. Tais equipamentos, que por muitas vezes apresentam fontes chaveadas em seu circuito eletrônico ou possuem características não lineares inerentes ao seu princípio de funcionamento, proporcionam deformações nas formas de onda presentes nas instalações elétricas, o que resulta nas chamadas tensões e correntes harmônicas. Diante desta conjuntura foi utilizado um software para realizar simulação de uma carga não-linear e avaliar as injeções harmônicas e suas consequências em um sistema elétrico.

Palavras-chaves – Harmônicas, Qualidade de Energia, Aplicativo Computacional.

ANALYSIS OF HARMONIC DISTORTIONS GENERATED BY NON-LINEAR LOADS THROUGH PQA SOFTWARE

Abstract - This paper highlights the importance of analyzing the disturbances occurring in the power grid due to the circulation of harmonic currents, since the use of electronic devices and other nonlinear equipment started to grow intensively in residential, commercial and industrial premises. Such equipment, which often have switched source in its electronic circuit or have nonlinear characteristics inherent to its working principle, provides deformations in the waveforms present in electrical installations, resulting in so-called harmonic voltages and currents. Given this scenario, this paper presents simulation software to perform a non-linear load and evaluate the harmonic injections and its consequences in an electrical system.

Keywords – Harmonic, Power Quality, computational application.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o sistema elétrico brasileiro tem sofrido mudanças bastante consideráveis. Uma dessas mudanças

podem ser percebidas na qualidade da energia elétrica que é entregue ao consumidor, seja ele de pequeno ou grande porte.

Entende-se por energia elétrica de boa qualidade uma energia entregue de forma ininterrupta, com frequência estável, e com formas de ondas senoidais, ou seja, que permite que o equipamento funcione em sua forma pretendida sem a redução de sua vida útil [1]. Com a evolução da Eletrônica de Potência e a modernização dos processos industriais, nota-se um aumento significativo nos distúrbios gerados na rede elétrica. A entrada de diversos processadores eletrônicos, como fontes chaveadas, controladores de velocidade de máquinas elétricas, equipamentos de solda e demais conversores estáticos de potência, referidos como cargas não-lineares, em conjunto com uma grande quantidade de modernos dispositivos presentes nos setores comercial e residencial, tem causado um aumento significativo no nível de distorção harmônica de corrente e tensão no sistema elétrico [2].

Entretanto, a maior parte dos equipamentos responsáveis por tais distúrbios na rede são bem sensíveis aos mesmos, acarretando então uma atuação indesejada do respectivo equipamento, ou até mesmo o não funcionamento, caso a energia elétrica fornecida não seja de boa qualidade.

As cargas não-lineares são responsáveis por distorcer as formas de ondas de tensão e corrente no sistema elétrico. Portanto, elas reduzem a eficiência das redes, devido ao aumento das perdas elétricas, além de produzirem efeitos indesejáveis como: ressonâncias harmônicas, mau funcionamento de circuitos eletrônicos, interferências em sistemas de comunicação, além de vibrações, ruídos e estresse eletromecânico em transformadores, reatores e motores [3].

O aumento das exigências em matéria de supervisão, controle e desempenho nos sistemas de distribuição de energia elétrica, vem se tornando uma prática comum para as concessionárias, além de realizarem o monitoramento da qualidade de energia elétrica [4]. No Brasil, o fornecimento de energia elétrica é conduzido por regulamentações formalizadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que compreendem a qualidade do produto e a qualidade de serviço, apresentados no módulo 8 do PRODIST [5]. O primeiro é caracterizado pela forma de onda de tensão provida. Enquanto o segundo é basicamente entendido como quanto à concessionária é capaz de minimizar as interrupções na rede elétrica, sejam elas por curtos-circuitos ou por manutenções programadas.

Com o intuito de minimizar as consequências das distorções harmônicas, além de outros efeitos das cargas perturbadoras, e manter os padrões de qualidade de energia elétrica em níveis seguros e admissíveis, as concessionárias de energia elétrica têm estabelecido valores máximos para os



XII CEEL – ISSN 2178-8308
13 a 17 de Outubro de 2014
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

itens de qualidade da energia elétrica [5, 6]. Diante desta conjuntura, medidas corretivas no que tange a utilização de filtros passivos e ativos, além de técnicas de multiplicação de fase (transformadores de conexão) têm sido adotadas para reduzir ou eliminar a propagação das harmônicas pela rede elétrica. Assim como o consumidor é dono da carga não linear, ele será também, o responsável pela quantidade de corrente harmônica injetada no sistema. Contudo, se o consumidor estiver dentro dos limites admissíveis a respeito das correntes harmônicas injetadas por suas cargas, a responsabilidade pela correção do grau da distorção harmônica será incontestavelmente da concessionária. Não obstante, a atribuição da responsabilidade não é tão simples, visto que uma carga linear pode se comportar como carga não-linear se a tensão de alimentação se apresentar distorcida [7]. Portanto, é necessário investigar o comportamento dos equipamentos instalados na rede elétrica perante a presença desses distúrbios, pois os mesmos afetam o desempenho de vários dispositivos presentes no sistema elétrico, como por exemplo, os equipamentos de proteção e de manobra, bancos de capacitores, transformadores, medidores de energia elétrica, entre outros [1].

Para os fins aqui postos, este artigo foi feito para expor os problemas de qualidade da energia elétrica oriundas da operação de cargas não-lineares, com destaque para as distorções harmônicas produzidas, tendo como exemplo a máquina de solda, a qual consiste em uma carga bastante perturbadora para o sistema elétrico. Para tanto, as simulações serão realizadas no software PQA (Power Quality Analyzer), que utilizando técnicas de modelagem no domínio do tempo, permite avaliar os impactos dos distúrbios da qualidade da energia elétrica causados por cargas perturbadoras nas redes de distribuição.

II. HARMÔNICAS

Harmônicas são componentes de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental seja a onda um sinal de tensão ou corrente [8]. Deste modo, pode-se dizer que uma onda periódica contém distorções harmônicas quando sua forma de onda não é senoidal. O grau de distorção harmônica presente na corrente ou na tensão pode ser descrita matematicamente com base no estudo das ondas não senoidais periódicas, viabilizada por meio da série de Fourier [9]. O Teorema de Fourier indica que toda função periódica não senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões (série) que é composta:

- De um valor médio;
- De uma expressão senoidal (ou cossenoidal) em frequência fundamental;
- Expressões senoidais (ou cossenoidais) cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental (harmônicas).
- Requisito de convergência estabelecido por meio das condições de Dirichlet satisfeita.

Dessa forma, um sinal de tensão ou corrente periódico, não senoidal pode ser expresso, conforme indicado pelas equações em (1) e (2) respectivamente:

$$V(\omega t) = V_0 + V_{max} \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + V_{2max} \cdot \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + \dots + V_{hmax} \cdot \text{sen}(h\omega t + \varphi_h) \quad (1)$$

$$I(\omega t) = I_0 + I_{max} \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + I_{2max} \cdot \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + \dots + I_{hmax} \cdot \text{sen}(h\omega t + \varphi_h) \quad (2)$$

A Figura 01 apresenta um exemplo de uma onda de corrente harmônica e suas respectivas decomposições de ondas senoidais em suas componentes harmônicas de ordem 3ª, 5ª, 7ª e 9ª.

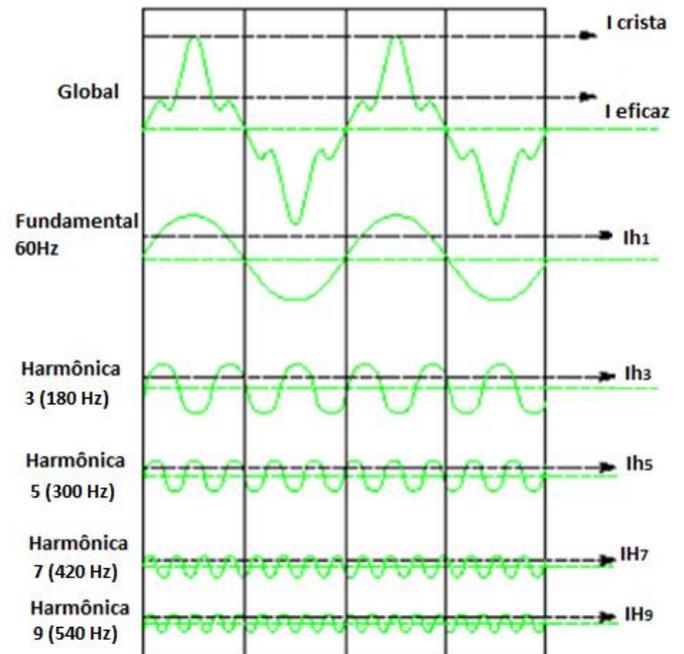


Fig. 1: Decomposição de onda com suas com harmônicas [10].

As harmônicas podem ser tanto de ordem par, quanto de ordem ímpar. As ímpares geralmente são de maior intensidade e as mais frequentes nas instalações elétricas, ou seja, são consideradas as principais fontes de problemas. De acordo com a ordem harmônica, ela pode ser classificada como de sequência positiva, negativa ou zero. A harmônica de primeira ordem (fundamental) é de sequência positiva, a de segunda ordem é de sequência negativa, a de terceira ordem é de sequência zero, a de quarta ordem é novamente de sequência positiva, e assim por diante.

Exemplo típico de uma situação que envolve as análises das harmônicas e suas respectivas sequências é a sua aplicação em um motor trifásico, em que as harmônicas de sequência positiva tenderiam a fazer o rotor girar no mesmo sentido da componente fundamental. As harmônicas de sequência negativa tendem a fazer o motor girar no sentido contrário ao giro produzido pela fundamental, freando assim o motor e causando o sobreaquecimento. Já as harmônicas de sequência zero não provocam efeitos no sentido de rotação do motor e nem no sentido contrário a rotação (frenagem), porém somam-se algebricamente no condutor neutro, com amplitude de até 3 vezes de sua corrente de terceira ordem, ocasionando então, o aquecimento excessivo do condutor neutro [10]. Essas harmônicas normalmente provocam aquecimentos indesejados em condutores, motores, transformadores, entre outros. As distorções harmônicas caminham contra os preceitos da qualidade do suprimento

disponibilizado por uma concessionária de energia elétrica, a qual deve abastecer aos seus consumidores uma tensão puramente senoidal, com amplitude e frequência constantes. No entanto, a entrega de energia a determinados consumidores que acarretam deformações no sistema alimentador prejudica não apenas o consumidor responsável pelo distúrbio, mas também outros conectados à mesma rede elétrica.

Com os valores de tensões ou correntes harmônicas presentes no sistema elétrico, usam-se os procedimentos quantitativos existentes na literatura atual, com o intuito de expressar o conteúdo harmônico em uma forma de onda. O mais conhecido e o mais aplicado é a “Distorção Harmônica Total”, a qual pode ser empregada tanto para sinais de tensões como para correntes, conforme equações (3) e (4), respectivamente.

$$DHT_V = \frac{1}{V_1} * \sqrt{\sum_{h>1}^{h \max} V_h^2} * 100\% \quad (3)$$

$$DHT_I = \frac{1}{I_1} * \sqrt{\sum_{h>1}^{h \max} I_h^2} * 100\% \quad (4)$$

Onde:

V_h - Valor eficaz da tensão de ordem h;
 I_h - Valor eficaz da corrente de ordem h;
 V_1 - Valor eficaz da tensão fundamental;
 I_1 - Valor eficaz da corrente fundamental;
h – Ordem da componente harmônica.

As harmônicas se originam na corrente elétrica, devido à presença de equipamentos e cargas não lineares no sistema. As circulações dessas correntes harmônicas geram tensões harmônicas através das impedâncias da rede, e então uma deformação da tensão de alimentação. A presença das harmônicas em um sistema pode nem sempre causar danos imediatos, mas com o tempo, equipamentos expostos as correntes harmônicas podem vir a apresentar sérios problemas [11]. Os mais usuais são:

- Solicitação de isolamento: devido às distorções nas tensões;
- Solicitação térmica: devido à circulação de correntes harmônicas. Os principais efeitos causados pelas solicitações térmicas e de isolamento resultam em perda de vida útil de transformadores, das máquinas rotativas, dos bancos de capacitores, etc.;
- Operação indevida de diversos equipamentos elétricos (torques oscilatórios nos motores, atuação indevida dos controles, etc.).

Em consequência desses efeitos, uma gama de problemas pode ser relacionada, por exemplo: ressonâncias série e paralela, perdas excessivas em cabos e equipamentos, aumentos dos custos de manutenção devido às constantes falhas dos equipamentos, redução da vida útil das cargas e o aumento do isolamento em transformadores e capacitores;

Diante dos problemas supracitados, nota-se a importância de se realizar o controle das harmônicas perante a rede elétrica. Além disso, a falta de regulamentação nessa área tornou necessário estabelecer limites dos níveis de distorção harmônica, na tentativa de propiciar a compatibilidade do sistema elétrico com os níveis de qualidade da energia fornecida. O ONS, através do Submódulo 2.2 Padrões de Desempenho da Rede Básica oferece níveis tanto para as ordens ímpares como, também, para as componentes pares de tensão. Como podem ser visualizados na Tabela I, os valores máximos permitidos de Distorção Harmônica de Tensão Total para sistemas de distribuição de energia elétrica, com relação à tensão aplicada no Ponto de Acoplamento (PAC), são considerados para dois níveis distintos da tensão de operação.

Todavia, vale mencionar que este documento nacional não tem caráter normativo, com estabelecimento de punições aos infratores, sendo apenas uma recomendação aos diversos agentes conectados à rede básica [12].

Tabela I- Níveis de distorções Harmônicas de tensão expresso em relação a fundamental.

V < 69KV				V > 69KV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem (h)	%	Ordem (h)	%	Ordem (h)	%	Ordem (h)	%
3, 5 e 7	5	2, 4 e 6	2	3, 5 e 7	2	2, 4 e 6	1
9, 11 e 13	3	≥ 8	1	9, 11 e 13	1,5	≥ 8	0,5
15 a 25	2			15 a 25	1		
≥ 27	1			≥ 27	0,5		
DHTv = 6%				DHTv = 3%			

Ainda referente a Tabela I, o Submódulo 2.2 Padrões de Desempenho da Rede Básica ressalva as seguintes regras:

- Na definição destes limites, deve-se levar em consideração que, para cada ordem harmônica h, a tensão harmônica resultante em qualquer ponto do sistema é obtida da combinação dos efeitos provocados por diferentes Agentes.
- Esses limites não devem ser aplicados a fenômenos transitórios que resultem em injeção de correntes harmônicas, como ocorre na energização de transformadores.

Para a rede básica de energia, o Operador Nacional do Sistema (ONS) estabelece desde 2002 parâmetros de qualidade para a tensão suprida. Mas, do ponto de vista do consumidor, as restrições a serem consideradas são, na imensa maioria, as do sistema de distribuição, as quais ainda estão em discussão. Não obstante, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), no documento “Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – Prodinst módulo 8 – qualidade da energia elétrica”, propõe valores para a distorção harmônica da tensão no sistema de distribuição conforme a Tabela II [5].

Tabela II- Níveis de distorções Harmônicas de tensão expresso em relação a fundamental.

Tensão Nominal do Barramento (Vn)	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) %
Vn ≤ 1kV	10%
1kV < Vn ≤ 13,8kV	8%
13,8kV < Vn ≤ 69kV	6%
69kV < Vn ≤ 138kV	3%

De acordo com a recomendação IEEE-519-1992, a distorção harmônica total de corrente é definida como a distorção harmônica da corrente, em porcentagem, da máxima demanda da corrente de carga (demanda de 15 ou 30 min). Isso significa que a medição da DHTi deve ser feita no pico de consumo [13]. Distorções de corrente que resultem em nível CC não são admissíveis. A Tabela III mostra os respectivos limites das correntes harmônicas para cada ordem (distorção harmônica individual) e a distorção harmônica total de corrente.

Tabela III- Limites da distorção da corrente para sistemas de distribuição (120 V – 69KV).

Máxima corrente harmônica em % da corrente de carga I1						
Icc/ I1	< 11	11 ≤ n < 17	17 ≤ n < 23	23 ≤ n < 35	35 < n	DHTi
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 < 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 < 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 < 1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Os limites diferem de acordo com o nível de tensão e com o nível de curto-circuito do PAC. Obviamente, quanto maior for a corrente de curto-circuito (Icc) em relação à corrente de carga (I1), maiores serão as distorções de corrente admissíveis, uma vez que elas causarão menores impactos em relação à tensão no PAC. À medida que se eleva o nível de tensão, menores são os limites aceitáveis [13].

III. DISTORÇÃO HARMÔNICA INDIVIDUAL

Para se analisar a influência de apenas uma ordem harmônica, em relação à fundamental, pode-se também fazer a análise da Distorção Harmônica Individual, conforme equações (5) e (6).

- Distorção Harmônica de Corrente Individual (DIHI).

$$DIHI = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100\% \quad (5)$$

- Distorção Harmônica de Tensão Individual (DTHI).

$$DTHI = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100\% \quad (6)$$

Para os limites de tensão, os valores mais severos são para as tensões em nível de distribuição. Estabelece-se então, um

limite individual por componente e um limite para a distorção harmônica total, como pode ser visto na Tabela IV, [13].

Tabela IV- Limites de distorção Harmônica de tensão

Distorção Individual		THDv
V ≤ 69 kV	3%	5%
69 kV < V ≤ 161kV	1,5%	2,5%
V > 161kV	1%	1,5%

IV. SIMULAÇÕES REALIZADAS NO PQA

No intuito de analisar os impactos associados à operação de cargas não lineares em um sistema elétrico de distribuição, utilizou-se o aplicativo computacional PQA, que foi desenvolvido em um projeto de pesquisa e desenvolvimento firmado entre a UFU e uma concessionária de Energia Elétrica nacional. Os dados referentes a este projeto serão informados e referenciados na versão final deste artigo, caso o mesmo seja aprovado. Este aplicativo foi desenvolvido exclusivamente para análise da qualidade da energia em sistemas de distribuição de energia elétrica e sua interface disponibiliza todas as medições realizadas por um medidor específico da área, a exemplo de espectro harmônico de tensão e de corrente, desequilíbrios, fator de potência, VTCD (Variação de tensão de curta duração) dentre outros.

A Figura 2 mostra o sistema teste implementado no aplicativo, o qual teve a máquina de solda representando uma carga não linear para os estudos em questão.

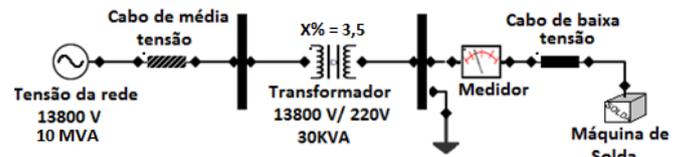


Fig. 2: Circuito simulado no software PQA.

A Figura 3 ilustra a forma de onda da tensão observada no ponto de conexão da máquina de solda com a rede de distribuição. Observa-se na figura que no instante igual a 3s, o sinal da tensão torna-se distorcido e desequilibrado. Isto acontece pelo fato de que neste instante a máquina de solda entra em operação. Este gráfico permite verificar o impacto proporcionado por este equipamento no momento do seu funcionamento.

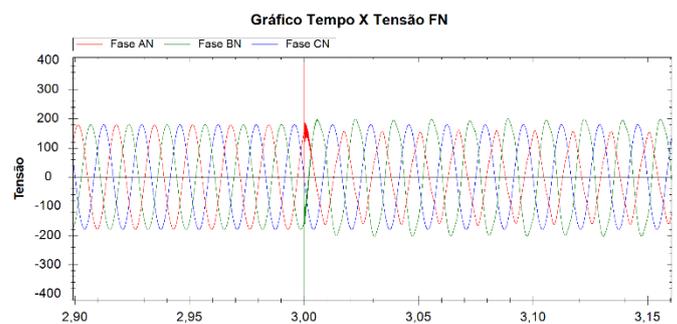


Fig. 3: Forma de onda de tensão no ponto de conexão da máquina de solda.

De forma a facilitar à análise da tensão, o medidor apresenta a tensão RMS juntamente com as faixas de caracterização da tensão em regime permanente definidas no módulo 8 do PRODIST, conforme ilustrado pela Figura 04. Observa-se que após a operação da máquina de solda, a tensão RMS não permaneceu na faixa adequada, tendo as tensões de fase A e B localizados na faixa crítica.

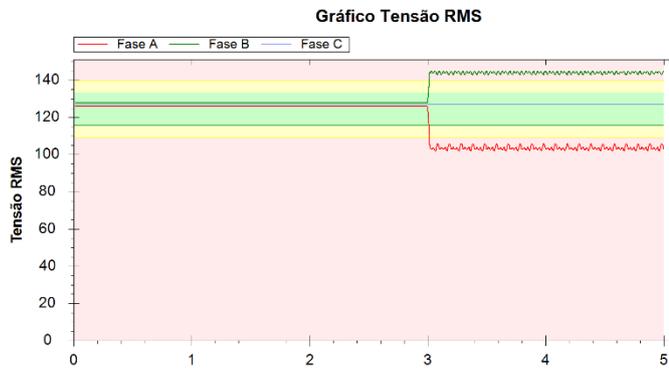


Fig. 04: Tensão RMS no ponto de conexão da máquina de solda na rede elétrica.

A Figura 5 exibe a forma de onda de corrente da máquina de solda, e percebe-se que a onda não apresenta uma forma senoidal, isso se deve pelo fato da máquina de solda apresentar uma característica não linear, intrínseca ao seu princípio de funcionamento, mesmo funcionando à vazio. No instante de tempo de simulação igual a 3s, a máquina de solda carga demanda uma elevada corrente, devido ao seu funcionamento sob carga estar baseado na aplicação de curtos-circuitos.

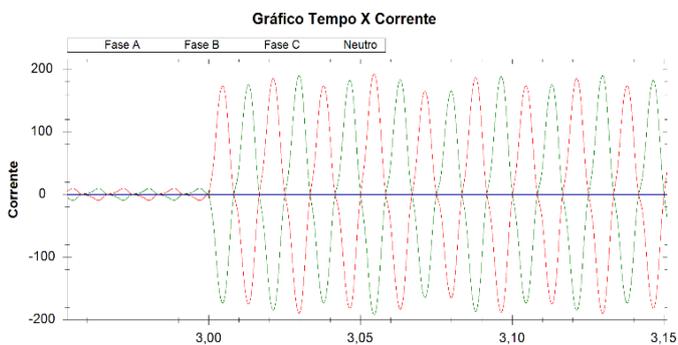


Fig. 5: Forma de onda de corrente da máquina de solda.

Após verificar a forma de onda da corrente da máquina de solda, torna-se interessante analisar seu espectro harmônico, para posteriormente, avaliar se as magnitudes das respectivas harmônicas se encaixam dentro dos limites propostos pelas recomendações. As Figuras 6 e 7 demonstram a transformada de Fourier da tensão e corrente, respectivamente, as quais indicam a quantidade de cada ordem harmônica presente no ponto de conexão do equipamento em relação à fundamental.

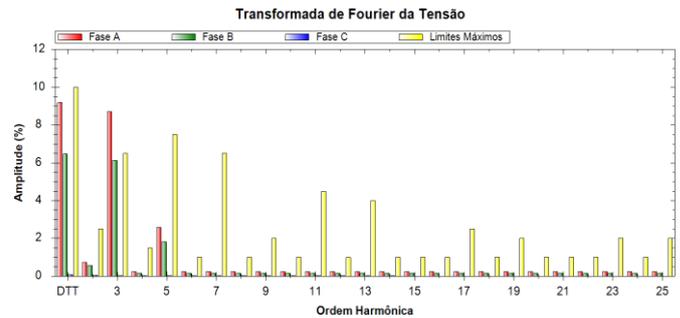


Fig. 06: Espectro Harmônico da tensão no ponto de conexão da máquina de solda na rede elétrica.

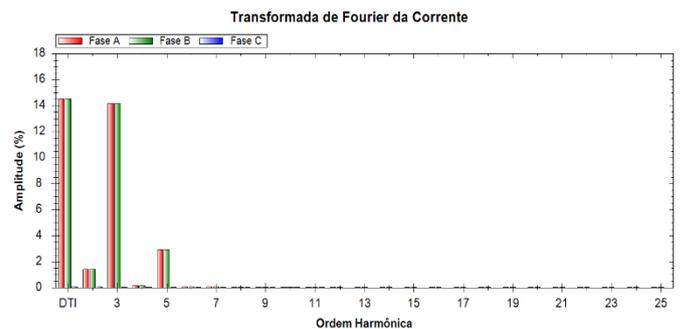


Fig. 07: Espectro Harmônico da corrente da máquina de solda.

Percebe-se pelos valores de distorção harmônica de tensão apresentados que a terceira ordem violou o limite recomendado pelo Prodist em seu módulo 8, enquanto a distorção total ficou muito próxima da violação do referente limite. Já em relação a distorção harmônica de corrente, apenas o documento IEEE-519-1992[13] estipula recomendações a respeito. Para o caso em análise também houve a violação da componente de 3ª ordem, sendo este limite de 12%, conforme Tabela III. Para as condições do sistema em análise a terceira harmônica de corrente atingiu um valor de 14,2%.

Outra funcionalidade do aplicativo é a apresentação do fator de potência. A Figura 8 mostra o fator de potência na fase A da carga perturbadora.

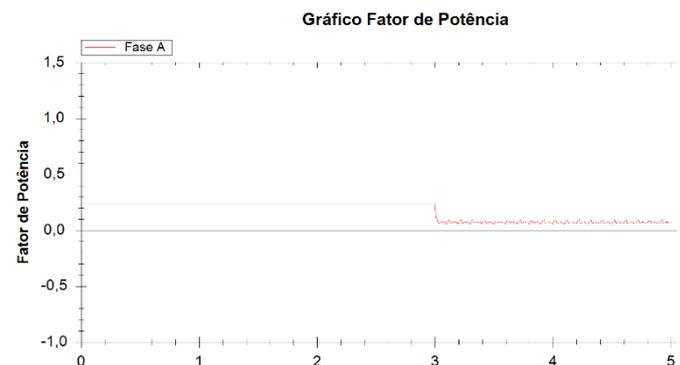


Fig. 08: Fator de potência da máquina de solda.

Nota-se que o fator de potência da máquina de solda está bastante abaixo do valor de referência de 0,92, apresentando um valor de 0,24. Vale ressaltar que o baixo fator de potência é umas das características intrínsecas ao princípio construtivo da máquina de solda, sendo altamente indutiva.

Com a utilização do aplicativo PQA também se pode verificar outro impacto significativo da operação da máquina

de solda, neste caso, o desequilíbrio de tensão ocasionado no ponto de conexão do equipamento com a rede elétrica. A Figura 9 indica esta consequência.



Fig. 9: Desequilíbrio de tensão causado pela máquina de solda.

No que tange ao desequilíbrio de tensão, para o nível de tensão de 220V não há limite recomendado, contudo é conhecido que valores acima de 2% já podem ocasionar, por exemplo, problemas de aquecimento e vibração em motores. Percebe-se, pela análise da Figura 9 que no instante em que a máquina de solda entra em operação, o desequilíbrio atinge valores em torno dos 20%.

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma síntese sobre as distorções harmônicas geradas pela máquina de solda e as respectivas recomendações propostas pelos agentes reguladores. Além disso, foram citados os conceitos de distorção harmônica individual e total de tensão e de corrente para um maior entendimento ao assunto. Foi proposta uma simulação no software PQA (Power Quality Analyzer) com o objetivo de revelar os efeitos e consequências da circulação das correntes harmônicas, além de outros impactos ocasionados por esta carga perturbadora. Outro foco em questão foi na exibição do medidor de qualidade da energia que permite visualizar as formas de onda resultantes, o espectro harmônico, fator de potência, desequilíbrios e outros itens de qualidade não contemplados neste artigo. Este trabalho mostrou que a utilização de ferramentas computacionais se mostram extremamente promissoras no que tange ao conhecimento e previsão dos impactos da conexão de novas cargas perturbadoras. Isto permite a possibilidade da tomada de decisões preventivas, ainda no planejamento, para que ações mitigadoras possam ser realizadas antes que o sistema venha a operar em condições anormais, sob o ponto de vista da qualidade da energia elétrica. O aplicativo computacional se mostrou bastante eficaz neste sentido.

REFERÊNCIAS

[1] Augusto Marconcin Rodrigues, “Influencia da distorção harmônica e de desequilíbrios em medidores de energia elétrica ativa”. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Paraná- 2009.
 [2] DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F. and. WAYNE BEATY, H., “Electrical Power Systems Quality”. McGraw Hill, 1996.
 [3] Abílio Manuel Variz; Sandoval Carneiro Jr.; José Luiz R Pereira; Pedro G. Barbosa, “Cálculo do fluxo de

harmônicos em sistemas de potência trifásicos utilizando o método de injeção de correntes com solução iterativa”, Sba Controle & Automação vol.19 no. 2 Natal /June 2008.

[4] Bath, S.K.; Kumra, S., “Simulation and Measurement of Power Waveform Distortions using LabVIEW”, International Power Modulators and High Voltage Conference, Proceedings of the 2008, pp 427 - 434.
 [5] Prodist – Módulo 8 – Seção 8.1- ANEEL – Revisão 2 de 01/01/2011 – Harmônicas.
 [6] DOMIJAN, SANTANDER, GILANI, LAMER, STILES, WILLIAMS. “Watt-hour meter accuracy under controlled unbalanced harmonic voltage and current conditions”. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 11, p. 64-72, Jan. 1996.
 [7] SANTOS, A. C.; OLIVEIRA, J. C.; SANTOS, I. N.; TAVARES, Carlos Eduardo “Avaliação do Método da Corrente Conforme e Não-Conforme para Compartilhamento de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas” SBSE 2014 - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu - PR.
 [8] Singh, R. ; Singh, A. “Energy Loss Due to Harmonics in Residential Campus–A Case Study” Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010, 45th International, pp 1 – 6.
 [9] Reis, M.J.C.S. ; Soares, S.; Cardeal, S.; Morais, R. ; Peres, E.; Ferreira, P.J.S.G. Global, “Teaching of Fourier Series Expansions in undergraduate education Engineering Education Conference”,(EDUCON), 2013 IEEE, pp 431 - 435.
 [10] CHAPMAN, D. Qualidade de Energia – Harmônicos. Schneider Electric Workshop, 2005.
 [11] Loana Nunes Velasco “Análise Experimental de Erros de Medição de energia elétrica Ativa em medidores eletromagnéticos tipo Indução, sujeitos a distorções harmônicas de correntes e tensões, em sistemas equilibrados e desequilibrados.” Dissertação de mestrado em engenharia elétrica, UNESP- Campus de Ilha Solteira, Abril – 2007.
 [12] Submódulo 2.2 Padrões de Desempenho da Rede Básica- Seção 10.4 – ONS- Revisão 2 de 24/12/2002.
 [13] IEEE Std 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.