

Qualidade de energia com o uso de inversores de frequência: Estudo de caso ventilador em uma plataforma off-shore

CARNEIRO, Manasses Guimarães

Universidade Salvador (UNIFACS)

Programa de Pós Graduação – Mestrado em Energia

Salvador-BA, Brasil

aerosmane@hotmail.com

Da SILVA, Kleber Freire

Universidade Salvador (UNIFACS)

Programa de Pós-Graduação – Mestrado em Energia

Salvador-BA, Brasil

kfreire@unifacs.br

Resumo— Avanços tecnológicos têm trazido grande eficiência para os sistemas elétricos como um todo, controles eletrônicos proporcionam aos usuários finais o objetivo do processo com um mínimo de gasto energético e desperdício de eletricidade. No entanto, medidas de eficientização de processos que envolvam eletricidade em maior ou menor proporção acarreta redução da qualidade de energia elétrica, podendo, em maior escala, impactar a rede elétrica vizinha. O presente artigo abordará como a eficientização de motores elétricos a partir de controladores de velocidade pode afetar a qualidade da energia elétrica analisando o inversor de frequência instalado em um ventilador de pressurização de uma plataforma de distribuição de gás natural.

Palavras Chave—Variadores de velocidade, motores elétricos, eficiência energética, harmônicos, qualidade de energia

I. INTRODUÇÃO

Os motores elétricos são as máquinas motrizes mais utilizadas em todo o mundo, estima-se que entre 43 e 46% da energia global consumida advém de motores elétricos [1], portanto os mesmos são um dos grandes focos de estudos que visam eficiência energética. Equipamentos mais eficientes podem utilizar variadores de velocidade no intuito de reduzir o consumo de energia elétrica; quando alimentado diretamente com a frequência da rede elétrica (60Hz no Brasil) um motor possui velocidade nominal e constante, uma alteração na frequência de alimentação do mesmo provocará também uma mudança em sua velocidade. Este artifício é utilizado, por exemplo, nos ar condicionados do tipo inverter, tão famosos por sua grande eficiência de energia; aparelhos deste tipo utilizam-se da variação da velocidade do motor do seu compressor para obter uma eficiência na energia elétrica gasta pelo mesmo.

Segundo [2] a energia consumida por um motor elétrico é proporcional ao cubo de sua velocidade, sendo assim, mesmo

uma pequena variação na velocidade de um motor pode significar uma grande economia de energia.

[1], analisando um sistema moto-bomba afirma que para uma redução hipotética de 50% da vazão requerida pelo processo a energia gasta utilizando-se variadores de velocidade pode ser 1/8 da energia consumida sem o mesmo.

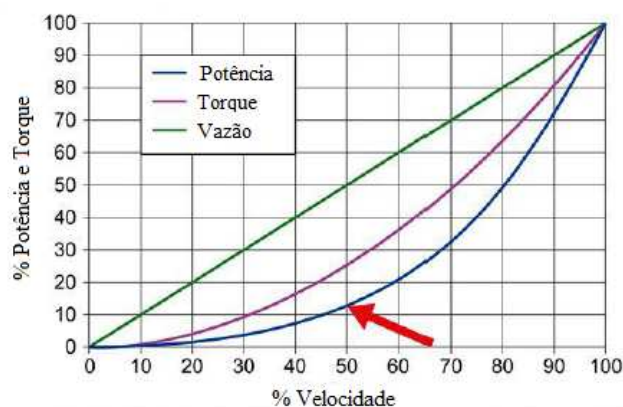


Figura 1: Gráfico Potência X Torque X Vazão
Fonte: Adaptado de [1]

Fica claro que os variadores de velocidade são uma ótima ferramenta para a eficientização de sistemas que utilizam motores elétricos, quando há uma grande variabilidade nas necessidades do processo como por exemplo alteração de vazão de uma bomba, pressão de descarga de um compressor, fluxo de ar em um ventilador, dentre outros, a variação de velocidade da máquina acionada traz consigo uma também redução na energia elétrica consumida pela motor acionador, tornando assim o processo mais eficiente.

Trabalhos neste sentido já foram amplamente discutidos na literatura como, por exemplo, [3] que conseguiram em sistemas de bombeamento de água reduzir o consumo de energia de 0,393 KWh/m³ para 0,234 KWh/m³ usando

variadores de velocidade associados a bombas hidráulicas, [4] alcançou 30% de economia de energia em sistemas de irrigação no setor agrícola; a indústria com sua grande capacidade e poder de consumo de energia elétrica, principalmente no tocante aos motores elétricos deve andar no mesmo viés assim como já propôs [5] que esperava atingir uma economia anual de energia de aproximadamente 4000 MWh no setor de destilação em uma refinaria.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Qualidade de Energia Elétrica

A existência de um controle eletrônico insere alguns problemas relacionados à qualidade da energia dispendida para o motor elétrico e seus impactos para a rede vizinha. Qualquer alteração no comportamento ou efeito esperado pela energia elétrica pode ser considerada uma alteração na qualidade da energia elétrica [6].

B. Harmônicos com o uso de Inversores de Frequência

Um dos problemas mais comuns associados à utilização de inversores de frequência é a inserção de harmônicos que aparecem devido à natureza de controle da velocidade do motor elétrico por este sistema, estes são caracterizados como distorções da forma senoidal da onda de potência fornecida ao equipamento [7]. O controle de velocidade ocorre devido à variação da frequência da corrente e tensão de alimentação do motor. De maneira básica o controle eletrônico recebe a tensão na frequência da rede elétrica, que no caso do Brasil, é de 60 Hz, retifica essa tensão para contínua e posteriormente para uma tensão e correntes alternadas e controladas em função de um sinal parametrizado do processo, esta tensão e frequência ajustadas promovem no motor elétrico a velocidade requerida como pode ser visto na Figura 2.

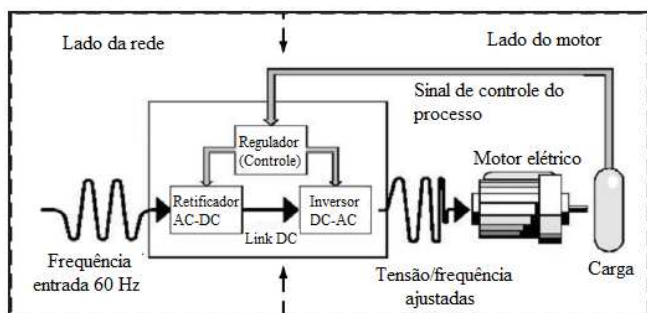


Figura 2: Esquema Básico de Inversor de Frequência
Fonte: Adaptado de [8].

Os problemas na qualidade da energia elétrica podem ser sentidos tanto do lado do motor quanto do lado da rede. Quando harmônicos são gerados do lado da rede, outros equipamentos ligados à mesma podem sofrer danos [8], efeitos como baixo fator de potência, perdas elétricas em virtude de sobreaquecimento [9] dentre outros podem danificar seriamente equipamentos da rede elétrica ou até mesmo o motor elétrico que está sendo alimentado pelo inversor. Os harmônicos gerados provocam tensões diferentes

daquelas para as quais os equipamentos foram projetados para operar e isto pode provocar danos aos equipamentos [10].

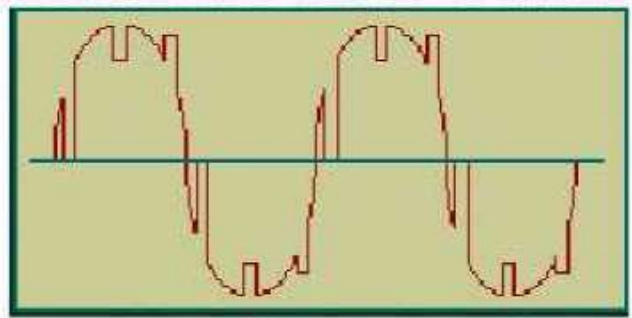


Figura 3: Distorções na Linha de Entrada de Tensão
Fonte: [11].

Para o motor a possível inserção de harmônicos provocará o aumento de perdas (queda do rendimento), da temperatura além de maiores vibrações e ruído [9].

III. ESTUDO DE CASO

A. Preâmbulo

O estudo de caso decorreu-se em uma plataforma de distribuição de gás natural cuja sala de controle é pressurizada com ar atmosférico refrigerado conforme Figura 4.

Um ventilador insufla ar para a sala de ar-condicionado (AC da Fig. 4), estes por sua vez condicionam o ar e o direcionam para as salas do prédio de operações. Com isto o prédio possui uma pressão interna maior que a do ambiente, o que impede a entrada de gás em caso de um possível vazamento na planta. O motor foco da análise (M) aciona o ventilador de insuflação (V) e tem potência de 30KW. O referido possui um inversor de frequência que recebe o sinal de medidores de pressão distribuídos no prédio (PIT) com o objetivo de controlar a pressão do ambiente indiretamente, já que, o efeito é provocado pela variação da velocidade do conjunto moto-ventilador e por consequência do volume de ar insuflado que será maior ou menor a depender do sinal enviado pelos medidores de pressão.

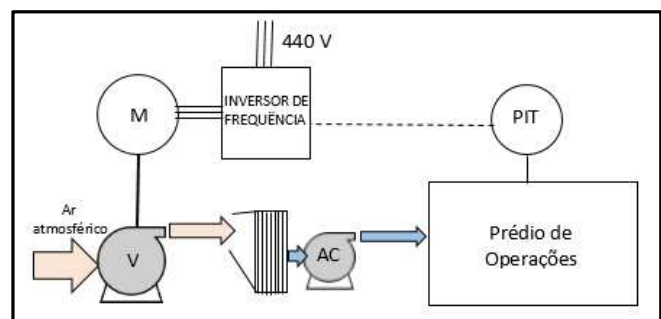


Figura 4: Esquema Simplificado do Sistema de Pressurização

B. Metodologia

Para verificar o efeito do inversor sobre a qualidade de energia foi instalado um analisador de qualidade energética

(RE-7000 da EMBRASUL) no painel elétrico do sistema, a medição foi realizada no período entre 21 e 27/10/2015, neste intervalo a operação da plataforma foi orientada a informar qualquer problema relacionado ao ventilador que pudesse alterar a qualidade ou confiabilidade da medição, o qual não ocorreu.

A Figura 5 evidencia a instalação do analisador no painel e seus respectivos pontos de medição; o analisador (“3” da Fig. 5) efetua a medição de corrente através de sensores instalados no ponto 1 e de tensão através das garras no ponto 2, o analisador utiliza essas variáveis para obter análises e cálculos do inversor de frequência que pode ser visto no ponto 4.



Figura 5: Painel do Ventilador com o Analisador Instalado

Na Figura 6 é apresentado o diagrama representativo da instalação física demonstrada na Fig.5, nesta pode-se comparar os pontos de medição 1 e 2 e o inversor 4, parametrizando estas representações com a Fig. 5.

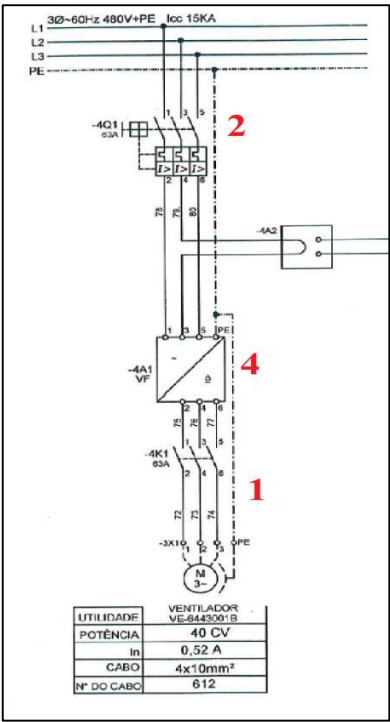


Figura 6: Diagrama do Sistema

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Não foram detectadas nas medições efetuadas presença de harmônicos que ultrapassassem os limites estabelecidos no [12] ou na [13], o maior harmônico de tensão foi percebido no dia 24/10/15 às 16:45 na fase B, neste horário as 3 fases, A, B e C, apresentavam distorções harmônicas totais (DHTu) de respectivamente 3,93, 5,30 e 4,79% (Figura 7).

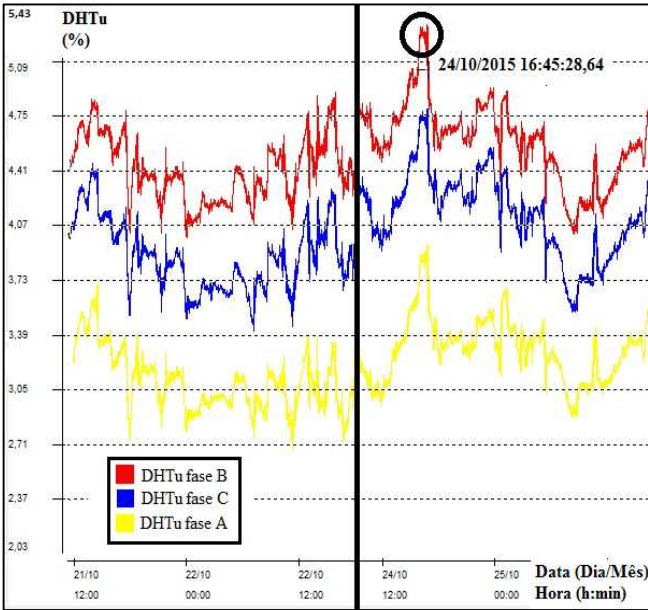


Figura 7: Fragmento do Gráfico DHTu

Segundo [12] a distorção harmônica total de tensão para equipamentos com tensão menor que 1KV pode chegar a um valor máximo de 10%, segundo [13] este valor tem um limite de 8%, o máximo DHTu medido ficou em 5,30%.

Não foi possível com as medições efetuadas realizar uma análise crítica do efeito das distorções harmônicas na corrente, segundo [13] e [14], uma avaliação mais criteriosa requer análise ampla da vizinhança e medições no ponto de acoplamento comum (*Point of Common Coupling-PCC*) as quais não foram realizadas.

No tocante a variações de tensão não foram observadas grandes distorções; a tensão nominal do motor é de 440V (fase-fase). De acordo com os gráficos obtidos pelo analisador e demonstrados na Figura 8, os valores variaram entre 270 V (fase A 22/10/15 às 08:00) para o máximo e 255V (fase B em 24/10/15 às 17:13) para o mínimo, uma variação de 6,2 e 0,3% respectivamente em relação ao esperado para este tipo de motores que é de 254V (fase-neutro).

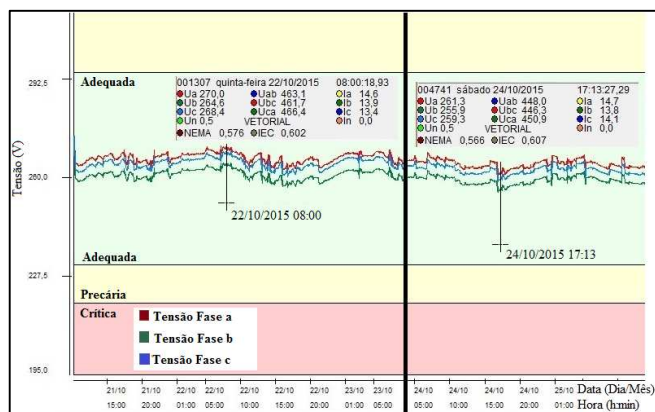


Figura 8: Extremos de Tensão Observados

V. LEGISLAÇÃO E MECANISMOS DE CORREÇÃO

Em nível normativo ainda não há legislação ou normas brasileiras que tratem diretamente do assunto qualidade de energia, o que existe é um documento elaborado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) denominado de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) que em seu módulo 8 [12] estabelece alguns parâmetros para o controle da qualidade de energia elétrica mas não o normatiza; em nível internacional podemos citar [13] que recomenda os limites permissíveis para harmônicos em redes elétricas, a NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) trata também do assunto em âmbito dos Estados Unidos através da *NEMA MG1 Motors and Generators* partes 30 e 31 e *NEMA-Application Guide for AC Adjustable Speed Drive System*, a IEC (*International Electrotechnical Commission*) em âmbito internacional destaca [14] como documento balizador para harmônicas de corrente, no entanto sem tratar diretamente as harmônicas de tensão mesmo sabendo que uma pode interferir diretamente na outra.

Para suavizar os efeitos dos picos de tensão gerados pelos harmônicos uma opção é a instalação de indutância na entrada do link DC do conversor, este procedimento irá suavizar os picos de tensão gerados pelos harmônicos do lado da rede e internamente no inversor. A redução do pico de tensão aumenta a vida útil dos componentes do sistema devido a atenuação das temperaturas alcançadas além de promover uma operação mais suave, deve-se, no entanto, atentar para a possibilidade de ressonâncias com o sistema que pode em contrapartida amplificar a tensão instantânea.

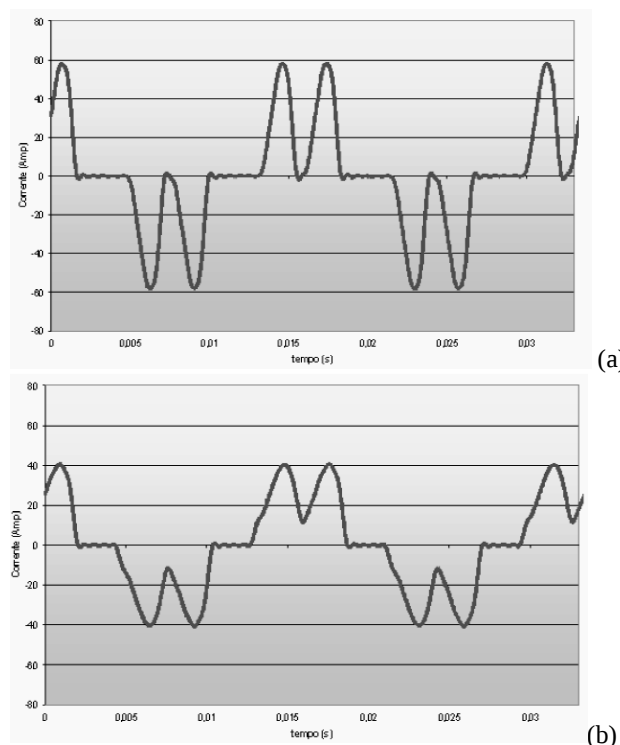


Figura 9: Perfis de Corrente na Entrada do Inversor
Fonte: [9]

A inserção de reatância pode também ser um mecanismo de correção, percebe-se pela Figura 9 que com este artifício (b), há uma suavização do pico de corrente além da diminuição do valor eficaz da corrente de entrada [9], diferentemente do que ocorre sem a reatância onde os picos são acentuados e danosos a rede e ao próprio inversor (a).

Medidas como instalação de filtros passivos de saída, e utilização de inversores com mais níveis de modulação, melhora na qualidade da modulação no caso de inversores PWM¹ (*Pulse-Width Modulation*) e aumento da frequência de chaveamento são uma das opções para reduzir a geração de picos harmônicos [9].

Em seu trabalho, [15] chegou a conclusão de que os capacitores presentes no link DC não só controlam a modulação da onda de entrada do inversor como também contribuem para a atenuação da inserção de harmônicos na

¹ Modelo construtivo de inversor de frequência que modula a frequência através de pulsos impostos de tensão

rede, apesar de afirmar que isoladamente não resolve a questão; em outra linha [16] afirma que os harmônicos sentidos para a corrente podem advir não somente de cargas não lineares como o inversor de frequência, mas também de tensões não senoidais advindas do PCC.

No estudo de caso o inversor de frequência possui filtro para harmônicos acoplado ao próprio equipamento e bobinas de circuito intermediário², isto pode ter interferido no resultado do estudo. O fabricante informa também que segue a normatização imposta pela [14] e pela [17] e que a distorção harmônica total de corrente não ultrapassara um máximo de 55,7% o que foi desmentido pelas medições de campo.

VI. CONCLUSÃO

Neste artigo foram efetuadas medições de qualidade de energia com foco na geração de harmônicos em um ventilador industrial que utiliza inversor de frequência para o controle de sua velocidade.

Não foi detectada qualquer anomalia quanto a inserção de harmônicos no circuito analisado, o inversor possui mecanismos de correção acoplados o que pode ter atenuado os efeitos sobre a qualidade de energia.

Ainda assim o advento dos controles eletrônicos sobre os equipamentos e rede elétrica é uma realidade e é esperado o incremento de estudos dos seus impactos sobre a qualidade de energia, a necessidade de processos mais eficientes e com menor impacto socioambiental irá amplificar o uso de dispositivos eletrônicos de controle, dentre eles principalmente inversores de frequência.

Já existem mecanismos tecnológicos de correção para a qualidade de energia elétrica e legislação a respeito deste item, no Brasil apesar da ANEEL ter elaborado o PRODIST não há regulamentação específica que force os concessionários e usuários a terem precauções quanto a inserção de defeitos de qualidade de energia elétrica na rede, no entanto, assim como ocorreu em países da Europa e nos Estados Unidos, o amadurecimento e desenvolvimento do setor irá forçar ações neste sentido o que pode ocorrer nos próximos anos.

REFERÊNCIAS

- [1] D. MAHESWARAN, J. KAILAS, G. RANGARAJ and A. KUMAR, "Energy Efficiency in Electrical Systems.," in *2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*, Bengaluru, 2012.
- [2] N. MOHAN, T. M. UNDELAND and W. P. ROBBINS, *Power Electronics – Converters, Applications and Design.*, vol. 3, John Wiley & Sons, 2003, pp. 399-434.
- [3] A. MARCHI, A. R. SIMPSON e N. ERTUGRUL, "Assessing variable speed pump efficiency in water distribution systems," *Drinking Water: Engineering and Science*, vol. 5, pp. 15-21, 2012.
- [4] J. A. B. ARAÚJO, *Aplicação de Inversor de Frequência Para Economia de Energia Elétrica em Sistemas de Irrigação por Aspersão*, Botucatu: Doutorado em Agronomia - Faculdade de Ciências Agrônomicas, 2003, p. 142.
- [5] R. OENNING, *Análise da viabilidade econômica de um projeto de implantação de variadores de velocidade em bombas centrífugas industriais*, M. F. d. Bahia, Ed., Salvador: Especialização em Engenharia Econômica – Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial, 2011.
- [6] G. PUTRUS, J. WIJAYAKULASOORIYA e P. MINNS, "Power Quality: Overview and Monitoring," em *Second International Conference on Industrial and Information Systems*, Penadenyia, 2007.
- [7] S. K. SHAH, A. HELLANY, M. NAGRIAL e J. RIZK, "Power Quality Improvement Factors: An Overview," em *11th Annual High-capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*, Charlotte, 2014.
- [8] C. KRIEL, R. JOUBERT e J. MARAIS, "The influence of variable speed drives on electric motor operating temperatures," em *Industrial and Commercial Use of Energy Conference (ICUE): Proceedings of the 10th*, Cape Town, 2013.
- [9] WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., "Guia técnico – Motores de Indução alimentados por Inversores de Frequência PWM," WEG, Jaraguá do Sul, 2010.
- [10] S. D. MACGREGOR, "An Overview of Power Quality Issues and Possible Solutions," em *IEEE Cement Industry Conference*, Rapid City, 1998.
- [11] B. CHATT, "Power Quality Issues with variable speed drive: A case Study for oil exploration Operation in Russia.," em *Region 5 Conference.*, San Antonio, 2006.
- [12] (ANEEL), AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, "Módulo 8: Qualidade de Energia, In: Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST," Brasília, 2015.
- [13] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, *IEEE Std. 519-2014*, New York, 2014.
- [14] IEC Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low voltage systems with input current >16 A and ≤ 75 A per phase, *IEC Standard 61000-3-12*, Genebra, 2011.
- [15] A. AQUILA, A. LASSANDRO e P. ZANCHETTA, "Modelling of line side harmonic currents produced by variable speed induction motor drives," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 13, n. 3, pp. 263-269, 1998.
- [16] J. MAZUNDAR, R. HARLEY, F. LAMBERT, T. HABETLER e G. VENAYAGARNOORTHY, "Monitoring the True Harmonic Current of a Variable Speed Drive Under Nonsinusoidal," em *Power Electronics Specialists Conference*, Jeju, 2006.

² Informação extraída do manual do equipamento

- [17] IEC Limits for harmonic current emissions (equipment input current less or equal 16A per phase), *IEC Standard 61000-3-2*, 2014.