

EFEITOS DO DESEQUILÍBRIOS E HARMÔNICOS NO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO E O CÁLCULO DE POTÊNCIAS DESEQUILIBRADAS

Dhébora Sayonara de Morais Severo¹
Luciano Coutinho Gomes²

Resumo: O presente trabalho analisa o efeito da presença de tensões e/ou correntes desbalanceadas e a presença de harmônicos no motor de indução trifásico. Apresenta os valores da norma da qualidade de energia para distorções harmônicas e para desbalanços de tensão. Além disso, mostra as equações da norma técnica do IEEE utilizada para cálculo de potências em sistemas desbalanceados. O software que foi desenvolvido no MATLAB é usado para calcular potências, distorções harmônicas e desbalanço de tensão. Os resultados obtidos mostram que o software desenvolvido pode calcular eficientemente os efeitos do desbalanço, e para as tensões e correntes simuladas pela fonte programável observou-se que o motor de indução apresentou a distorção harmônica dentro dos limites da norma, mas o desbalanço de tensão foi bem maior do que o permitido pela norma.

Palavras-chave: Desbalanço. Harmônico. Motor.

Abstract: This paper analyzes the effects of unbalance voltages/currents and harmonics on three-phase induction motor. It presents the standard values of energy quality to harmonic distortions and voltage unbalance. Besides that, shows the equations of the IEEE technical standard for calculation of unbalanced powers. The software developed in MATLAB is used to calculate powers, harmonic distortions and voltage unbalances. The simulation results show that the software can efficiently calculate those effects and for the voltage and current unbalance simulated by the programmable source, the induction motor presented a harmonic distortion within the limits of the standard, but the voltage unbalance was much higher than that allowed by the norm.

Keywords: Harmonic. Motor. Unbalance.

1. Introdução

A qualidade da energia elétrica fornecida tem sido um assunto recorrente, uma vez que tanto as concessionárias de energia quanto os consumidores têm interesse em fornecer e receber, uma energia isenta de perturbações, ou em níveis mínimos. A presença de distorções na corrente e/ou tensão que não contribui para a geração de trabalho é altamente indesejável no sistema

¹ Engenheira de Controle e Automação (UNIFEI), Mestranda em Engenharia Elétrica (UFU), Professora da Faculdade do Noroeste de Minas (FINOM). E-mail: dhesayonara@gmail.com

² Doutor em Engenharia Elétrica (UFU), Professor da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). E-mail: lcgomes@ufu.br

elétrico.

Com o uso cada vez mais frequente de técnicas não-lineares de controle (retificação, inversão, chaveamento, etc.) e a utilização de cargas não lineares, começaram a aparecer as formas de ondas distorcidas, que comprometem o perfeito funcionamento do sistema elétrico e seus equipamentos, em especial os motores.

Desse modo, tornou-se necessário analisar essas formas de onda não-senoidais que começaram a se manifestar e conseqüentemente analisar a potência elétrica advinda destas distorções. Aliado a isto, tem-se o fato do uso recorrente e crescente dos motores na indústria. Este fato mostra a necessidade do desenvolvimento de pesquisas para avaliar o comportamento dos motores de indução diante a presença de perturbações na rede.

Nos motores de indução trifásico, os mais utilizados, deficiências como tensões ou harmônicos na fonte de tensão pode resultar em problemas como perdas excessivas, sobretensões, oscilações mecânicas e interferências. Detectar estas condições anormais nas máquinas é de grande importância.

A influência de distorções nas formas de onda em sistemas polifásicos é um assunto antigo. Porém a definição de potências que equacionem e que se aplique em tais condições, ainda é um desafio da engenharia elétrica.

Este trabalho analisará os efeitos das tensões desequilibradas e na presença de harmônicos na eficiência do motor de indução trifásico, considerando seus aspectos normativos.

Desequilíbrio e Distorções Harmônicas

O desequilíbrio em um sistema elétrico trifásico se trata de uma condição onde as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo e defasagem angular entre fases diferentes de 120° , ou mesmo as duas condições simultaneamente. De acordo com GOSBELL e PERERA (2002) o desequilíbrio de tensão pode ser definido utilizando-se a teoria de componentes simétricas. A razão entre componentes de sequência negativa ou zero, com a componente de sequência positiva, pode ser usado para especificar a porcentagem de desequilíbrio.

A origem dos desequilíbrios costumeiramente advém dos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, propiciando o surgimento no circuito de tensões de sequência negativa. Este problema é agravado quando consumidores

alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da rede. Tensões desequilibradas podem também ser resultado de queima de fusíveis em uma fase de um banco de capacitores trifásicos.

Um sinal periódico contém componentes harmônicas quando a forma de onda é deformada em relação a um sinal senoidal. A existência de harmônicos causa deformação, distorção, no sinal senoidal impactando a qualidade da energia.

Nos sistemas de energia os harmônicos se originam na corrente elétrica devido a cargas não-lineares conectadas a rede. As harmônicas deterioram a qualidade da energia e originam sobrecarga da rede e condutores, vibrações e envelhecimento de transformadores, alternadores e motores além da deformação da tensão e perturbação das redes de comunicação e linhas telefônicas.

Normas

Os Procedimentos de Distribuição de energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) são documentos elaborados pela ANEEL e normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. O Módulo 8 deste documento trata exclusivamente de definições relacionadas à qualidade da tensão suprida aos consumidores e estabelece os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço.

Os procedimentos de qualidade de energia elétrica definidos neste módulo devem ser observados por consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição; produtores de energia; distribuidoras; agentes importadores ou exportadores de energia elétrica.

Segundo a norma da ANEEL (2017), os limites de distorções harmônicas de tensão, nomeado como DTT%, são apresentados em porcentagem da fundamental na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1: Limites das Distorções Harmônicas Totais de Tensão

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_n \leq 1,0kV$	$1,0kV \leq V_n \leq 69kV$	$69kV \leq V_n \leq 230kV$
DTT(%)	10,0%	8,0%	5,0%

Fonte: PRODIST– Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica (2017) – ANEEL.

E os limites para os indicadores de distorção de tensão (FD%) são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Limites para o Desequilíbrio de Tensão

Indicador	Tensão Nominal	
	$V_n \leq 1,0\text{kV}$	$1,0\text{kV} \leq V_n \leq 69\text{kV}$
FD(%)	3,0%	2,0%

Fonte: PRODIST– Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica (2017) – ANEEL.

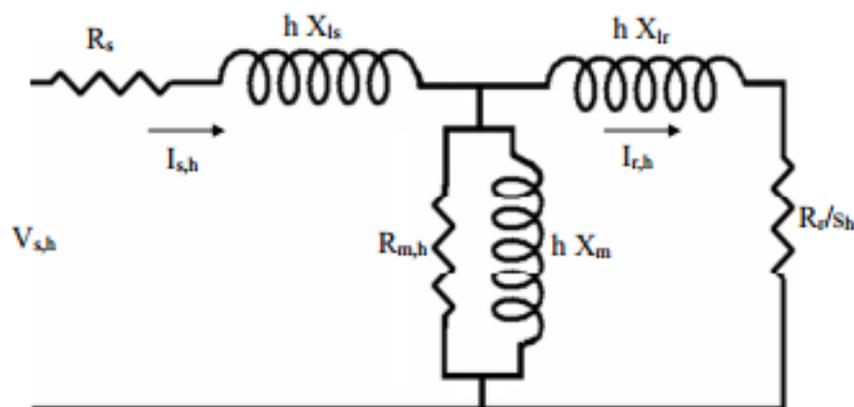
Efeito no Motor de Indução Trifásico

O motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo é o mais utilizado em aplicações industriais devido as suas vantagens inerentes em comparação com outros motores AC. Essas vantagens; especialmente a confiabilidade e durabilidade, só podem ser alcançadas se o motor de indução for fornecido com tensões de entrada balanceadas senoidais com magnitude apropriada e frequência.

Circuito Equivalente: Um circuito equivalente do motor de indução é apresentado de acordo com os trabalhos de DERAZ e AZAZI (2017) e NEVES et al.. (2016) que leva em consideração os harmônicos e perdas do núcleo do motor, a fim de estudar os efeitos de baixa ordem nos harmônicos de tensão, quando são introduzidos pela distribuição e condições de distorção de tensão.

A Figura 1 mostra o circuito equivalente do motor de indução modificado desenvolvido em DERAZ e AZAZI (2017), no qual as perdas no núcleo do ferro são expressas pela resistência ($R_{m,h}$) conectada em paralelo com o ramo de magnetização.

Figura 1: Circuito equivalente modificado do motor de indução considerando as perdas no núcleo.



Fonte: S. A. Deraz e H. Z. Azazi (2017)

Observando a Figura 1 identifica-se (R_s) que é a resistência do estator, (X_{ls}) reatância de fuga do estator, (R_m) resistência à magnetização, (X_m) reatância de magnetização, (R_r) resistência do rotor e (X_{lr}) reatância de fuga do rotor. Esses valores são determinados experimentalmente usando testes tradicionais sem carga e com rotor bloqueado em valores nominais.

Efeitos do Desequilíbrio: Segundo os estudos realizados em DERAZ e AZAZI (2017), NEVES et al. (2016) e LEE et al. (1998) foi possível observar os efeitos no motor de indução pelo desequilíbrio e harmônicos. De acordo com DERAZ e AZAZI (2017) dos fatores que confirmam a redução da eficiência de um Motor de Indução Trifásico é a presença de distúrbios de qualidade de energia elétrica em sua tensão de alimentação, como o desequilíbrio de tensão e a distorção harmônica.

O dano potencial causado por tensões harmônicas para um motor de indução trifásico vem principalmente do rotor vibração e superaquecimento. Além do seu impacto no sistema elétrico no desempenho do motor de indução, harmônicos também introduzem stress nos sistemas mecânicos. Quando um motor de indução é acionado por uma fonte poluída, o motor gera um torque pulsante harmônico que pode causar vibração durante a operação. Os impactos observados são: superaquecimento, danos de isolamento, redução de eficiência, pulsações de torque e flutuações de velocidade.

Potência Elétrica em Sistemas Desequilibrados

As definições propostas para o cálculo de potência em sistemas desbalanceados se divergem pela falta de senso comum em relação à definição da potência reativa e se diferenciam com relação a interpretação física da mesma. Analisando as definições, conclui-se do trabalho DEKMAN e POMILIO (2009) que a proposta atual do grupo IEEE é a mais adequada para o cálculo de potência em sistemas desequilibrados com harmônicos porque ela faz a decomposição de sinais harmônicos e faz uso de cálculos simples para equacionar os sinais de tensão, corrente e potência, mostrando ser um método eficaz para o cálculo da mesma.

Assim, a técnica utilizada neste trabalho para os cálculos de potências em sistemas trifásicos desequilibrados e com a presença de harmônicos é a proposta pelo IEEE.

O equacionamento apresentado pelo método do IEEE em ALVES e SANTOS (2010) define as potências e distorções harmônicas de tensão em sistemas elétricos desequilibrados na presença de harmônico. Desse modo, o equacionamento abaixo apresentado de potências, distorções, desbalanço e fator de potência é baseado neste trabalho.

Potência Ativa: A potência ativa (P) para cargas trifásicas desbalanceadas, é obtida pela soma das potências ativas das fases A, B e C:

$$P = P_a + P_b + P_c$$

(1)

Onde:

$$\begin{aligned} P_a &= V_{a1}I_{a1}\cos(\alpha_{a1} - \beta_{a1}) + \sum_{h \neq 1} V_{ah}I_{ah}\cos(\alpha_{ah} - \beta_{ah}); \\ P_b &= V_{b1}I_{b1}\cos(\alpha_{b1} - \beta_{b1}) + \sum_{h \neq 1} V_{bh}I_{bh}\cos(\alpha_{bh} - \beta_{bh}); \\ P_c &= V_{c1}I_{c1}\cos(\alpha_{c1} - \beta_{c1}) + \sum_{h \neq 1} V_{ch}I_{ch}\cos(\alpha_{ch} - \beta_{ch}) \end{aligned}$$

Potência Aparente: A potência aparente efetiva (S_e) é calculada tomando como base uma carga trifásica equivalente resistiva balanceada que apresenta as mesmas perdas em potência de uma carga trifásica real. Geralmente, a carga equivalente é ajustada para permitir que a transferência de potência seja máxima.

$$S_e = 3V_eI_e$$

(2)

A tensão efetiva (V_e) é relacionada ao valor eficaz da componente fundamental (V_{e1}) e ao valor eficaz das componentes harmônicas (V_{eH}):

$$V_e = \sqrt{V_{e1}^2 + V_{eH}^2}$$

(2.1)

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2}{18}}$$

(2.1.1)

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{3(V_{aH}^2 + V_{bH}^2 + V_{cH}^2) + V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2}{18}}$$

(2.1.2)

De modo análogo a corrente efetiva (I_e) pode ser escrita como de acordo com a equação 2.2.

$$I_e = \sqrt{I_{e1}^2 + I_{eH}^2}$$

(2.2)

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2}{3}}$$

(2.2.1)

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2 + I_{nH}^2}{3}}$$

(2.2.2)

Fator de Potência: O fator de potência efetivo para cargas desbalanceadas representa o índice de utilização do circuito de transmissão considerando tanto o desbalanço da carga quanto as distorções harmônicas. Ele é representado em na equação (3).

$$FP_e = \frac{P}{S_e}$$

(3)

Onde: P é a potência ativa e S_e é a potência aparente efetiva

Potências das seqüências: a seguir as expressões utilizadas para cálculo de potência ativa das seqüências positiva (P_1^+), negativa (P_1^-), e zero (P_1^0).

$$P_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \cos(\angle \widehat{V}_1^+ - \angle \widehat{I}_1^+) \quad (4)$$

$$P_1^- = 3V_1^- I_1^- \cos(\angle \widehat{V}_1^- - \angle \widehat{I}_1^-) \quad (5)$$

$$P_1^0 = 3V_1^0 I_1^0 \cos(\angle \widehat{V}_1^0 - \angle \widehat{I}_1^0) \quad (6)$$

Onde:

V_1^+, V_1^-, V_1^0 : tensões de seqüência.

$\widehat{V}_1^+, \widehat{V}_1^-, \widehat{V}_1^0$: tensões de seqüência com módulo e fase.

I_1^+, I_1^-, I_1^0 : correntes de seqüência.

$\widehat{I}_1^+, \widehat{I}_1^-, \widehat{I}_1^0$: correntes de seqüência com módulo e fase.

A potência reativa das seqüências está presente nas equações (7), (8) e (9).

$$Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sin(\angle \widehat{V}_1^+ - \angle \widehat{I}_1^+) \quad (7)$$

$$Q_1^- = 3V_1^- I_1^- \sin(\angle \widehat{V}_1^- - \angle \widehat{I}_1^-) \quad (8)$$

$$Q_1^0 = 3V_1^0 I_1^0 \sin(\angle \widehat{V}_1^0 - \angle \widehat{I}_1^0) \quad (9)$$

As potências aparentes de seqüência positiva, de seqüência negativa e de seqüência zero, na frequência fundamental, podem ser escritos em termos das tensões e correntes de seqüência.

$$S_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \quad (10)$$

$$S_1^- = 3V_1^- I_1^- \quad (11)$$

$$S_1^0 = 3V_1^0 I_1^0 \quad (12)$$

As distorções harmônicas totais de tensão e de corrente são definidas como a seguir:

$$DTT_e = \frac{V_{eH}}{V_{e1}}$$

(13)

Distorção harmônica efetiva total de corrente:

$$DTI_e = \frac{I_{eH}}{I_{e1}}$$

(14)

O desbalanço das tensões (FDT) para a frequência fundamental é determinado pela razão entre tensões de seqüência negativa e seqüência positiva, conforme (15).

$$FDT = \frac{V_1^-}{V_1^+}$$

(15)

2. Metodologia

Materiais

Para a simulação de tensões e correntes desbalanceadas e com harmônicos foi utilizada uma fonte programável, representada pela Fig. 2, da AMETEK Programmable Power, cujo modelo é o CSW5550. A mesma é empregada para alimentar o motor de indução trifásico.

Figura 2: Fonte programável AMETEK – Modelo CSW5550.



Fonte: O autor (2019).

O motor de indução trifásico utilizado foi um motor da WEG, sendo seus dados de placa apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Dados da placa do moto de indução trifásico.

Motor de Indução trifásico gaiola de esquilo WEG	
Categoria N – 60Hz – IP55 – F.S 1,15 – S1 – Classe Isolação F	
Potência (KW/CV)	2,2/3,0
Tensão (Δ/Y)	220/380 V
Corrente (Δ/Y)	8,3/4,86 A
Fator de Potência	0,84
Velocidade	3450 rpm
I_p/I_n	6,7

Fonte: O autor (2019).

Para a medição das tensões e correntes aplicadas no motor foi utilizado o osciloscópio. Através dele, foram extraídos os dados de tensão e corrente desequilibrados e na presença de harmônicos, aplicados pela fonte programável ao motor de indução.

Procedimento

As fórmulas do cálculo de potência pelo método do IEEE foram desenvolvidas no MATLAB gerando um algoritmo que calcula as potências ativa, reativa, aparente, fator de potência e distorções harmônicas.

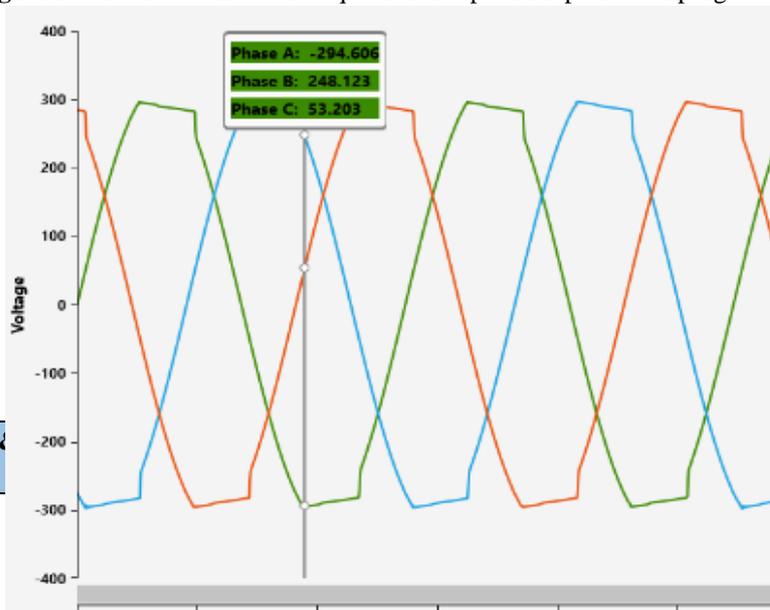
Na fonte programável da AMETEK foram simulados valores de tensões e correntes desequilibradas, as quais foram aplicadas no motor de indução trifásico. Com o auxílio do osciloscópio, conectando-se uma ponta de prova em cada uma das fases do motor, foi possível medir as tensões e correntes aplicadas pela fonte. Esses dados foram salvos em uma tabela no Excel.

Os dados da tabela Excel foram extraídos através de um algoritmo do MATLAB e neste mesmo algoritmo foram definidos os cálculos necessários afim de calcular a potência elétrica em condições desbalanceadas e com a presença de harmônicos no motor de indução trifásico.

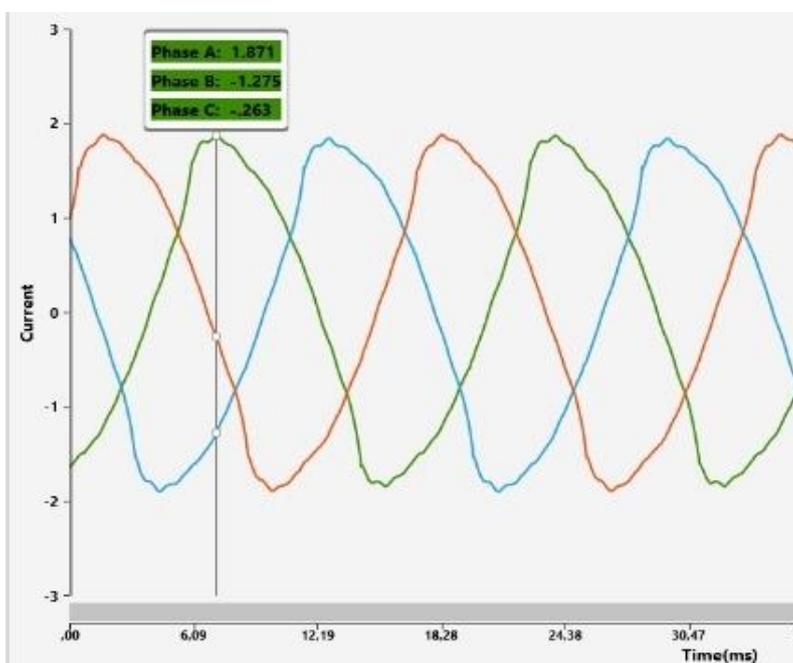
3. Resultados e discussão

Na fonte programável é possível mensurar grandezas como tensão, corrente, potência ativa e aparente, defasamento angular e fator de potência. As tensões e correntes trifásicas desequilibradas aplicadas no motor de indução trifásico pela fonte extraídas do software da fonte programável são apresentadas nas Figuras Figura 3 e Figura 4, respectivamente.

Figura 3: Tensões trifásicas desequilibradas aplicadas pela fonte programável



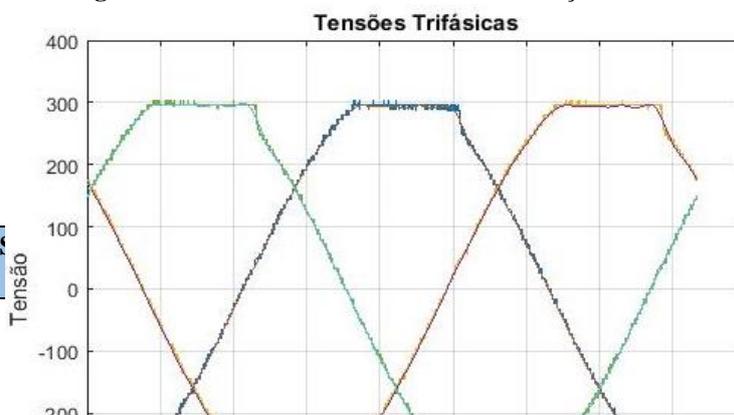
Fonte: O autor (2019).
Figura 4: Corrente trifásicas desequilibradas aplicadas pela fonte programável



Fonte: O autor (2019).

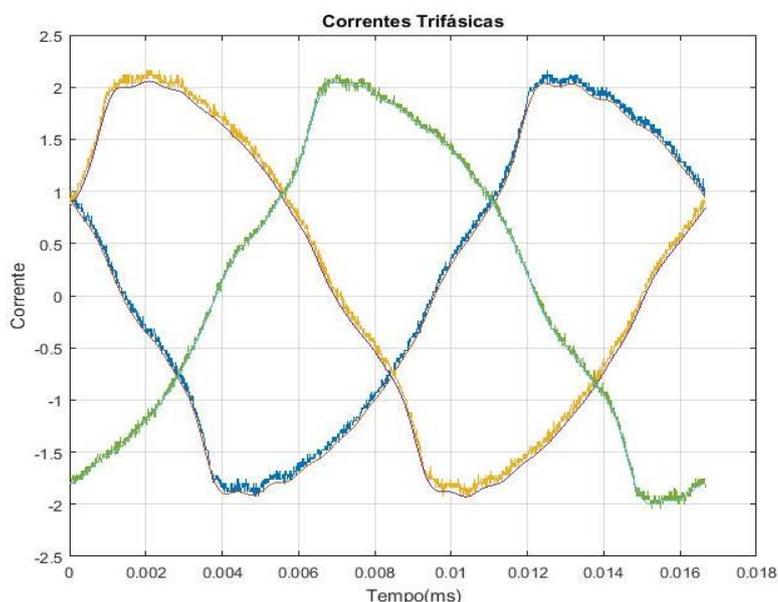
Após a medição das tensões e correntes pelo osciloscópio, essas foram enviadas ao MATLAB via Excel e o algoritmo desenvolvido extraiu esses dados possibilitando construção das figuras Figura 5 e Figura 6, que apresentam as tensões e correntes aplicadas pela fonte a serem utilizadas como base para o cálculo de potências elétricas.

Figura 5: Tensões trifásicas do motor de indução no MATLAB.



Fonte: O autor (2019).

Figura 6: Correntes trifásicas do motor de indução no MATLAB.



Fonte: O autor (2019).

Observando as figuras apresentadas é possível afirmar que o osciloscópio conseguiu medir com eficiência as tensões e correntes aplicadas pela fonte, uma vez que a reconstrução dos sinais de tensão e corrente feita pelo MATLAB é idêntico aqueles apresentados pelo software da fonte programável.

Além disso, o algoritmo desenvolvido no MATLAB calcula as potências elétricas e distorções harmônicas e de tensão no motor de indução trifásico nas condições de desequilíbrio. Desse modo, a Tabela 4 apresenta esses valores calculados no MATLAB pelo software desenvolvido.

Tabela 4: Dados calculados pelo algoritmo desenvolvido no MATLAB.

Variável Calculada	Valor
Potência Ativa (W)	1800,26
Potência Aparente (VA)	1275,96
Fator de Potência Efetivo	1,41
Distorção Harmônica de Tensão (%)	4,61
Distorção Harmônica de Corrente (%)	9,57
Desbalanço de Tensão (%)	100,34
Potência Ativa de sequência positiva (W)	0,77
Potência Ativa de sequência negativa (W)	0,82
Potência Ativa de sequência zero (W)	1790,89
Potência Reativa de sequência positiva (VAr)	-0,0035
Potência Reativa de sequência negativa (VAr)	-0,0128
Potência Reativa de sequência zero (Var)	62,30
Potência Aparente de sequência positiva (VA)	0,77
Potência Aparente de sequência negativa (VA)	0,82
Potência Aparente de sequência zero (VA)	1791,98

Fonte: Dados da simulação feita em MATLAB (2019)

Analisando os dados apresentados na Tabela 4 observa-se que a distorção harmônica de tensão do sistema apresentado está dentro do limite imposto pela norma de qualidade de energia, uma vez que é menor 10%, considerando tensões nominais menores ou iguais a 1,0kV. Porém, o desbalanço de tensão para a frequência fundamental está muito acima do estipulado pela norma, 3% para uma tensão nominal menor ou igual a 1,0kV, o valor apresentado para este sistema é de 100,34%.

4. Conclusão

Fica evidente a importância da análise dos efeitos causados pela presença de desequilíbrios e harmônicos nos sinais de corrente e/ou tensão aplicados no motor de indução trifásico, uma vez que este é amplamente utilizado. A presença de tais distúrbios, na rede

elétrica, acarreta a redução da eficiência do motor e conseqüentemente da sua vida útil, pois gera sobreaquecimento, pulsações de torque e flutuações de velocidade. Além disso, existem normas regulamentadoras da qualidade de energia que especificam os limites de desequilíbrio de tensão na rede e de distorções harmônicas.

Com o desenvolvimento deste trabalho foi possível calcular as potências e distúrbios no motor de indução elétrico através de um algoritmo desenvolvido no MATLAB que eficientemente consegue aferir os efeitos das perturbações no motor de indução trifásico, baseando-se na norma técnica do IEEE que define o equacionamento para potências desequilibradas na presença de harmônicos.

5. Referências

ALVES, C. B. e SANTOS, E. B., *Cálculo de potências aparente, ativa, não ativa e indicações de distorção e desbalanço e fator de potência segundo Buchholz-Goodhue e IEEE Standart 1459-2010*, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010. Acesso em 10 jan. 2019.

ANEEL, Norma. *Procedimentos de Distribuição de energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica*, , Revisão 8, Jan. 2017.

DECKMAN, S. M. e POMILIO, J. A. *Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS*, UNICAMP/FEEC/DSCE, Jul, 2009.

DERAZ, S. A. e AZAZI, H. Z., *Impact of Distorted Voltage on Three-Phase Induction Motor Performance*, in Proc. 2017 IEEE 17th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), pp. 857-863.

GOSBELL, V.; PERERA, S. e SMITH V. (2002), *Voltage Unbalance*, Technical Note 06, Energy Power Quality Centre, University of Wollongong, School of Electrical, Computer & Telecommunications Engineering. Disponível em: <http://www.elec.uow.edu.au/apqrc/content/technotes/technote6.pdf>. Acesso em 22 de jan. 2019.

GARCIA, F. R. "Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência", *IESA S/A*. [Online]. Disponível em: http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicosepccap.pdf. Acesso em 14 de fev. 2019.

LEE, C-Y., El al.. *Effects of Voltage Harmonics on the Electrical and Mechanical Performance of a Three-phase Induction Motor*, *IEEE*, pp. 88-94, 1998.

NEVES, A. B. F, El al.. *Effects of Voltage Unbalance and Harmonic Distortion on the Torque and Efficiency of a Three Phase Induction Motor*, *IEEE*, pp. 943-948, 2016.

SAHU, S.; DASH, R. N.; PANIGRAHU, C. K. e SUBUDHI, B. *Unbalanced Voltage Effects and its Analysis on an Induction Motor*, in Proc. 2017 IEEE International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA), pp. 263-268.

SCHNEIDER/Procobre. Brasil (Março, 2003). *Qualidade de energia Harmônicas*. Workshop Instalações Elétricas de Baixa Tensão. [Online]. Disponível em: <https://eletricaes.com.br/downloads/qualidade-de-energia-harmonicas.pdf>. Acesso em 04 fev. 2019