



CÁLCULO DE POTÊNCIAS ATIVA, NÃO ATIVA, APARENTE E FATOR DE POTÊNCIA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS SUBMETIDOS A DESEQUILÍBRIOS E DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO

Dhébora Sayonara de Morais Severo*¹, Bruno Lemos Neves¹, Cássio Alves de Oliveira¹, Vinícius Marcos Pinheiro¹, Augusto W. F. V. da Silveira¹, Luciano Coutinho Gomes¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo – Este trabalho tem por objetivo aplicar as definições propostas pela Norma IEEE 1459-2000 para o cálculo de potências e fator de potência de motores de indução trifásicos, MIT, submetidos a desequilíbrios e distorções harmônicas de tensão. São analisadas três situações por meio de ensaios experimentais utilizando uma fonte de tensão controlada. As situações são: a) aplicação apenas da componente fundamental; b) aplicação de harmônicos ímpares, do 1º ao 13º; c) aplicação de desequilíbrio na amplitude; os resultados apresentados são comparados e demonstram a validade do método; permitem análises dos efeitos causados no MIT.

Palavras-Chave – desequilíbrio de tensões, distorções harmônicas, motor de indução trifásico.

CALCULATION OF ACTIVE, NON-ACTIVE, APPARENT POWER AND POWER FACTOR OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS FED BY UNBALANCED AND HARMONIC VOLTAGE DISTORTIONS

Abstract – This work aims to apply the definition proposed by IEEE 1459 standard for the calculation of power and power factor of three-phase induction motors, MIT, under unbalances and voltage harmonic distortions. Three cases are analyzed by experimental test using a controlled voltage source. The cases are: a) application of only the fundamental component; b) application of odd harmonics, from 1st to 13th; c) application of amplitude unbalance. The results presented are compared and show the validity of the method and allow analysis of the effects caused on MIT.

Keywords – voltage unbalance, harmonic distortion, three-phase induction motor.

I. INTRODUÇÃO

As questões a respeito da qualidade da energia elétrica vêm sendo muito abordadas na atualidade, uma vez que tanto as

quanto os consumidores têm interesse em, respectivamente, fornecer e receber uma energia isenta de perturbações, ou em níveis mínimos [1].

Com o uso cada vez mais frequente de técnicas não-lineares de controle (retificação, inversão, chaveamento, etc.) e a utilização de cargas não lineares [1], começaram a surgir deformações nas formas de onda das tensões e correntes, o que pode interferir ou comprometer o funcionamento do sistema elétrico e os equipamentos que nele estão conectados, como é o caso dos motores.

Desse modo, tornou-se necessário o estudo mais aprofundado dos efeitos dos conteúdos harmônicos e outras perturbações presentes na rede, de forma a analisar seus impactos sobre os equipamentos que nela estão conectados. Paralelamente a isto, tem-se a crescente utilização das máquinas rotativas nas indústrias, em especial os motores de indução trifásicos.

Nos motores de indução trifásicos, desequilíbrios de tensões ou conteúdos harmônicos provenientes da fonte de alimentação podem resultar em problemas como: perdas excessivas, sobretensões, oscilações mecânicas e interferências. Detectar estas condições anormais nas máquinas é de grande importância para empregar ações corretivas adequadas, garantir a sua vida útil e seu perfeito funcionamento.

A influência das distorções nas formas de onda em sistemas polifásicos é um assunto já recorrente. Contudo, no que tange à determinação das potências elétricas nessas condições, esta ainda se apresenta como um desafio à engenharia elétrica.

Nesse sentido, este trabalho teve por objetivo determinar as potências elétricas de um motor de indução trifásico quando submetido a tensões desequilibradas e conteúdos harmônicos, utilizando, para isso, ensaios práticos e recursos computacionais.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Desequilíbrio e Distorções Harmônicas

O desequilíbrio em um sistema elétrico trifásico diz respeito a uma condição onde as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo, defasagem angular entre as fases diferente de 120°, ou, então, as duas condições

*dhesayonara@gmail.com

concessionárias de energia

simultaneamente. De acordo com [2] o desequilíbrio de tensão pode ser definido por meio da teoria das componentes simétricas. A razão da componente de sequência negativa ou zero, com a componente de sequência positiva, é empregado para especificar a porcentagem de desequilíbrio.

A origem dos desequilíbrios normalmente está relacionada com a distribuição inadequada de cargas monofásicas no sistema de distribuição, que é trifásico, o que contribui para o surgimento das tensões de sequência negativa. Este problema também é agravado quando consumidores com alimentação trifásica possuem uma inadequada distribuição das cargas em seu circuito interno. Outra situação que contribui para o aparecimento das tensões desequilibradas está relacionada com a queima de fusíveis em uma das fases de um banco trifásico de capacitores.

Um sinal contém componentes harmônicas quando a sua forma de onda está distorcida quando comparada a um sinal perfeitamente senoidal. Essa distorção, seja ela na tensão ou na corrente, acaba interferindo na qualidade da energia elétrica.

A origem dos conteúdos harmônicos normalmente está relacionada com a presença de cargas não lineares conectadas a rede. Como consequência, acabam interferindo na qualidade da energia, originando sobrecargas nos condutores, vibrações, envelhecimento dos transformadores, alternadores e motores e interferências nas redes de comunicação.

B. 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 quando comparado com outros motores, como sua robustez, funcionamento simples e alta eficiência. Contudo, a maior parte dessas só ocorrem quando o motor é alimentado com tensões balanceadas e com o mínimo de conteúdo harmônico.

1) Efeitos do Desequilíbrio e Distorções Harmônicas

Segundo os estudos realizados em [4], [5] e [6], foi possível observar os efeitos no motor de indução pela presença de desequilíbrio e conteúdos harmônicos. De acordo com [4], os desequilíbrios de tensão e as distorções harmônicas apresentaram-se como os principais distúrbios na qualidade da energia que resultaram na redução na eficiência do motor de indução trifásico.

Os principais efeitos dos harmônicos de tensão em um MIT são: vibrações, superaquecimento, stress mecânico, possíveis danos a isolamento, redução da eficiência, pulsações no conjugado, flutuações de velocidade. Outros fenômenos tais como [12] o *cogging*, que é a recusa da partida suave, e o *crawling*, que é o aparecimento de um grande escorregamento, também podem aparecer, sendo ambos resultados do fluxo de distribuição resultante no entreferro produzido pelos harmônicos.

C. Normas

Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) são documentos elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), de forma a normatizar e padronizar as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. O Módulo 8 deste documento trata exclusivamente das definições relacionadas à qualidade da tensão fornecida 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, por empresas geradoras, distribuidoras e agentes importadores ou exportadores de energia elétrica.

Os limites das distorções harmônicas totais de tensão (DTT%) em porcentagem com relação a frequência fundamental (60Hz) e os limites aceitáveis de desequilíbrio de tensão (FD%), ambos definidos pelo PRODIST, são apresentados, respectivamente, na Tabela 1 e 2.

Tabela 1: Limites das distorções harmônicas totais de tensão

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} \leq V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n \leq 230 \text{ kV}$
DTT%	10,0%	8,0%	5,0%

Tabela 2: Limites para o desequilíbrio de tensão

Indicador	Tensão Nominal	
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} \leq V_n \leq 230 \text{ kV}$
FD%	3,0%	2,0%

D. Potência Elétrica em Sistemas Desequilibrados

As definições propostas para o cálculo da potência em sistemas desbalanceados se divergem pela falta de senso comum em relação à definição da potência reativa, principalmente no que diz respeito sobre a interpretação física de tal grandeza. Analisando os diversos trabalhos presentes na literatura, foi possível concluir que, a partir do trabalho desenvolvido em [9], a proposta atual do grupo IEEE é a mais adequada para o cálculo da potência em sistemas desequilibrados com harmônicos, em razão da decomposição do sinal principal em diversos sinais com diferentes frequências, empregando, posteriormente, um equacionamento simples para determinar a potência de cada sinal.

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

O equacionamento empregado é apresentado em [8], onde são definidas as potências em sistemas elétricos desequilibrados e com a presença de harmônicos.

E. Equacionamento

A seguir são apresentadas as principais equações utilizadas no cálculo das potências ativa, não ativa, aparente e do fator de potência seguindo o modelo desenvolvido por [8].

$$P_a = V_{a_1} I_{a_1} \cos(\alpha_{a_h} - \beta_{a_1}) + \sum V_{a_h} I_{a_h} \cos(\alpha_{a_h} - \beta_{a_h}) \quad (1)$$

$$P_b = V_{b_1} I_{b_1} \cos(\alpha_{b_h} - \beta_{b_1}) + \sum V_{b_h} I_{b_h} \cos(\alpha_{b_h} - \beta_{b_h}) \quad (2)$$

$$P_c = V_{c_1} I_{c_1} \cos(\alpha_{c_h} - \beta_{c_1}) + \sum V_{c_h} I_{c_h} \cos(\alpha_{c_h} - \beta_{c_h}) \quad (3)$$

Onde:

h – Ordem harmônica (múltiplo inteiro da frequência fundamental).

I_{a_1}, I_{b_1} e I_{c_1} – Valores eficazes das componentes fundamentais da corrente.

V_{a_h}, V_{b_h} e V_{c_h} : Valores eficazes das componentes harmônicas da tensão.

β_{a_1}, β_{b_1} e β_{c_1} – Ângulos de fase das componentes fundamentais da corrente (rad).

$\alpha_{a_h}, \alpha_{b_h}, \alpha_{c_h}, \beta_{a_h}, \beta_{b_h}$ e β_{c_h} – Ângulos de fase das componentes harmônicas da tensão e da corrente (rad), respectivamente.

2) Potência ativa fundamental

$$P_1 = P_1^+ + P_1^- + P_1^0 \quad (4)$$

Onde:

P_1^+ – Potência ativa de sequência positiva.

P_1^- – Potência ativa de sequência negativa.

P_1^0 – Potência ativa de sequência zero.

3) Potência ativa não-fundamental

$$P_H = P - P_1 \quad (5)$$

Onde:

P_H – Potência ativa não-fundamental.

P – Potência ativa.

P_1 – Potência ativa fundamental.

4) Potência aparente efetiva

$$S_e = 3V_e I_e \quad (6)$$

Onde:

S_e – Potência aparente efetiva.

V_e – Tensão efetiva.

I_e – Corrente efetiva.

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

$$V_e = \sqrt{V_{e1}^2 + V_{eH}^2} \quad (7)$$

1) Potência ativa

Para cargas trifásicas desbalanceadas, a potência ativa total é obtida pela soma das potências ativas das fases (P_a, P_b, P_c) dadas pelas Equações (1), (2) e (3).

Onde:

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{3(V_{a_1}^2 + V_{b_1}^2 + V_{c_1}^2) + V_{ab_1}^2 + V_{bc_1}^2 + V_{ca_1}^2}{18}} \quad (8)$$

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{3(V_{a_H}^2 + V_{b_H}^2 + V_{c_H}^2) + V_{ab_H}^2 + V_{bc_H}^2 + V_{ca_H}^2}{18}} \quad (9)$$

De modo análogo, a corrente efetiva (I_e) pode ser escrita de acordo com a Equação 10.

$$I_e = \sqrt{I_{e1}^2 + I_{eH}^2} \quad (10)$$

Onde:

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a_1}^2 + I_{b_1}^2 + I_{c_1}^2}{3}} \quad (11)$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{I_{a_H}^2 + I_{b_H}^2 + I_{c_H}^2}{3}} \quad (12)$$

5) Fator de potência efetivo

$$FP_e = \frac{P}{S_e} \quad (13)$$

Onde:

FP_e – Fator de potência.

P – Potência ativa (W).

S_e – Potência aparente efetiva (VA).

6) Potência reativa fundamental

$$Q_1 = Q_1^+ + Q_1^- + Q_1^0 \quad (14)$$

Onde:

Q_1 – Potência reativa fundamental.

Q_1^+ – Potência reativa de sequência positiva.

Q_1^- – Potência reativa de sequência negativa.

Q_1^0 – Potência reativa de sequência zero.

7) Potência aparente harmônica

$$S_{eH} = 3V_{eH}I_{eH} \quad (14)$$

Onde:

S_{eH} – Potência aparente harmônica.

V_{eH} – Tensão efetiva eficaz das componentes harmônicas.

I_{eH} – Corrente efetiva eficaz das componentes harmônicas.

8) Potência aparente de desbalanço

$$S_{U1} = \sqrt{(S_{e1})^2 + (S_1^+)^2} \quad (15)$$

Onde:

S_{U1} – Potência aparente do desbalanço.

S_{e1} – Potência aparente efetiva fundamental.

S_1^+ – Potência aparente de sequência positiva.

III. METODOLOGIA

A. Materiais

Para os ensaios experimentais com tensões desbalanceadas, bem como com distorções harmônicas, foi empregado uma fonte programável da *AMETEK Programmable Power*, cujo modelo é o CSW5550. A mesma é empregada para alimentar o motor de indução trifásico.

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

Tabela 3: Dados da placa do motor de indução utilizado.

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)	8,39/4,86 A
Fator de Potência	0,84
Velocidade	3450 rpm
I_p/I_n	6,7

Para as aquisições dos dados das tensões e correntes aplicadas pela fonte ao motor, foi utilizado a placa PCI 6229 e o *software* LABVIEW, ambos desenvolvidos pela *National Instruments*. A placa PCI 6229 foi empregada em razão da sua confiabilidade na aquisição de dados, sendo essa conectada ao

bloco de terminais, modelo SCB-68, também da *National Instruments*. A esse bloco são conectadas três placas de condicionamento de sinais para a aquisição dos sinais de tensão e corrente de cada fase do motor.

As placas de condicionamento de sinais são necessárias em razão dos elevados níveis de tensão e corrente a serem mensurados, o que não é possível de ser realizado diretamente pelas entradas do bloco de terminais de leitura da placa PCI 6229, sendo necessário a conversão das grandezas. Essa placa, além de converter a tensão e corrente para níveis baixos de tensão (-10V a 10V), também filtra sinais de altas frequências a fim de evitar ruídos e efeitos de *aliasing*.

B. Procedimentos

As equações para os cálculos das potências pelo método do IEEE foram implementadas no *software* de cálculo numérico MATLAB, onde o algoritmo gera como respostas os valores das potências ativa, reativa, aparente, fator de potência, distorções harmônicas e desequilíbrio de tensão.

Na fonte programável da AMETEK foram simulados diversos cenários com valores de tensões desequilibradas, as quais foram aplicadas no motor de indução trifásico.

Por meio da placa PCI 6229, juntamente com as placas de condicionamento de sinais e o bloco de terminais, foi possível aferir os valores das tensões e correntes nas três fases do motor.

Um programa de aquisição de dados desenvolvido no LABVIEW permitiu com que esses dados fossem adquiridos com taxa de amostragem e quantidades de pontos definidas pelo usuário, sendo os dados posteriormente armazenados em arquivo txt.

Os dados mensurados foram extraídos por meio de um algoritmo no MATLAB e neste mesmo algoritmo foram definidas as equações necessárias a fim de calcular as potências elétricas em condições desbalanceadas e com a presença de harmônicos no motor de indução trifásico.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o intuito de analisar o funcionamento do algoritmo implementado, bem como sua eficiência, foram realizados ensaios com alimentação com: (1) tensão senoidal e equilibrada, (2) tensão com harmônicos ímpares e (3) tensão com desequilíbrios de amplitude.

O ensaio com componentes harmônicas ímpares foi realizado adicionando à componente fundamental, por meio dos recursos disponíveis na fonte programável, 8% de componente de terceira ordem, 5% de quinta ordem, 2% de sétima ordem, 3% de décima primeira ordem, 1% de décima terceira ordem e 1% de décima sétima ordem.

Para o ensaio com alimentação com desequilíbrio de amplitude, a fonte programável foi programada conforme os valores de tensão e defasagem apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Dados para o ensaio com desequilíbrio amplitude.

	Fase AB	Fase BC	Fase CA
Tensão (Vrms)	229,51	225,22	220,85
Defasagem (Graus)	30,62	-91,27	150,65

Na Tabela 5 e 6 estão indicados, respectivamente, as componentes de sequência positiva e negativa da tensão de alimentação do motor.

Tabela 5 - Componentes de sequência positiva para o ensaio com desequilíbrio de amplitude.

	Fase AB	Fase BC	Fase CA
Tensão (Vrms)	225,17	225,17	225,17
Defasagem (Graus)	30,00	-90,00	150,00

Tabela 6 - Componentes de sequência negativa para o ensaio com desequilíbrio de amplitude.

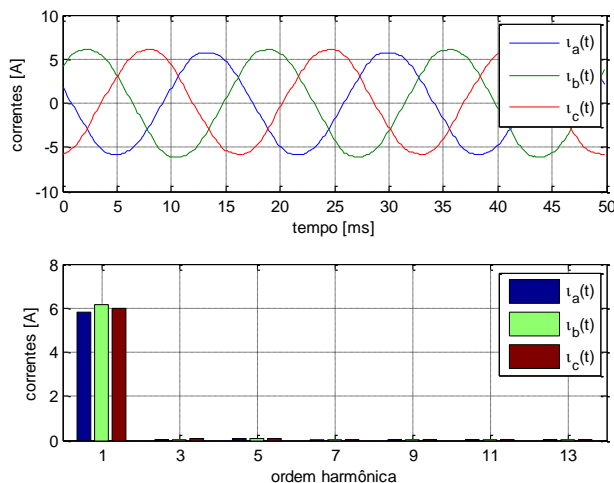
	Fase AB	Fase BC	Fase CA
Tensão (Vrms)	5,00	5,00	5,00
Defasagem (Graus)	60,00	180,00	-60,00

A. Gráficos obtidos para cada ensaio experimental

A seguir são apresentados os gráficos das correntes e dos seus espectros harmônicos para cada ensaio, realizados conforme os procedimentos estabelecidos anteriormente. As curvas obtidas permitem analisar o comportamento das correntes frente as alterações estabelecidas sobre as tensões que alimentam o motor de indução trifásico.

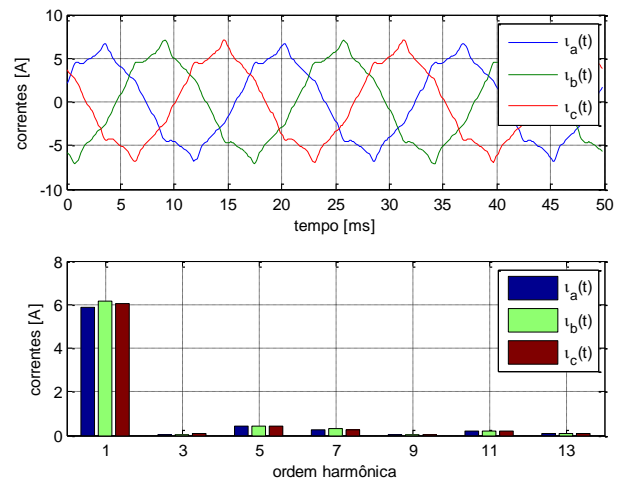
1) Tensão de alimentação senoidal

Figura 1 - corrente para ensaio do caso (1)



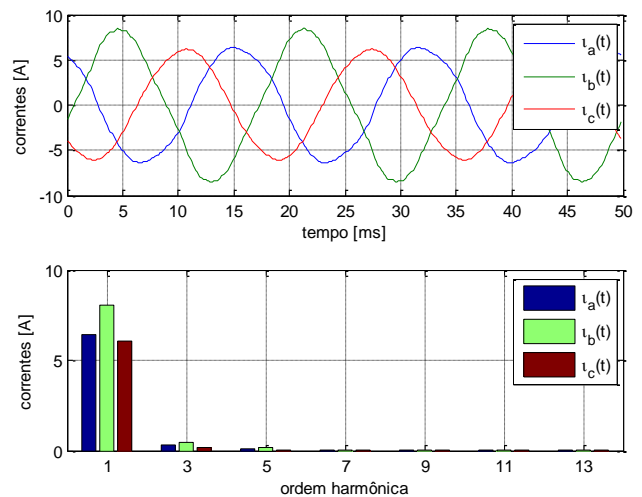
2) Tensão de alimentação com harmônicos ímpares

Figura 2 - corrente para o caso (2)



3) Tensão de alimentação com desequilíbrio na amplitude

Figura 3 - corrente para o ensaio do caso (3)



Observando os gráficos gerados pelos ensaios realizados é possível observar que no desequilíbrio na amplitude ocorreu o surgimento de harmônicos de 3ª e 5ª ordem no sinal da corrente, fazendo com que o sinal ficasse distorcido.

B. Potências e fatores de potência calculados

As potências calculadas para cada ensaio estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros calculados para cada ensaio realizado

Parâmetros	Ensaio		
	(1)	(2)	(3)
Potência Ativa (W)	231,63	235,93	261,70
Potência Aparente Efetiva (VA)	1623,87	1638,43	1914,36
Fator de potência efetivo	0,14	0,14	0,13
Potência Ativa fundamental (W)	231,63	233,48	261,73
Potência Aparente Fundamental (VA)	1623,53	1626,16	1911,92

Potência Aparente de Desbalanço (VA)	35,66	34,20	339,79
Potência Reativa fundamental (VAr)	1606,54	1608,96	1863,77
Fator de potência de deslocamento	0,14	0,14	0,13
Potência não ativa (VAr)	33,03	200,12	96,64
Potência Aparente Harmônica (VA)	0,00	12,20	0,00
Potência Ativa Não Fundamental (W)	0,00	2,44	0,00

V. CONCLUSÕES

É evidente a importância da análise dos efeitos causados pela presença de desequilíbrios e harmônicos nos sinais de tensão aplicados no motor de indução trifásico, uma vez que a presença de tais distúrbios, na rede elétrica, acarreta a redução da eficiência do motor e consequentemente da sua vida útil.

Com o desenvolvimento deste trabalho foi possível quantificar e observar os efeitos de desequilíbrios de tensões e harmônicos no MIT através do cálculo de potências, análise do comportamento de tensões e correntes e do espectro harmônico.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAPEMIG, Capes e ao CNPq pelo apoio financeiro, e à UFU pela infraestrutura disponibilizada.

REFERÊNCIAS

- [1] I. N. Santos. Método da superposição modificado como uma nova proposta de atribuição de responsabilidades sobre distorções harmônicas. Tese de doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. 2011.
- [2] V. Gosbell, S. Perera e V. Smith (2002), “Voltage Unbalance”, Technical Note 06, Energy Power Quality Centre, University of Wollongong, School of Electrical, Computer & Telecommunications Engineering. Acedido em 22 de Janeiro de 2019, em: <http://www.elec.uow.edu.au/apqrc/content/technotes/technote6.pdf>
- [3] Procedimentos de Distribuição de energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, Norma ANEEL, Revisão 8, Jan. 2017.
- [4] S. A. Deraz e H. Z. Azazi, “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.
- [5] A. B. F. Neves, M. V. B. Mendonça, A. L. F. Filho e G. Z. Rosa, “Effects of Voltage Unbalance and Harmonic Distortion on the Torque and Efficiency of a Three Phase Induction Motor” *IEEE*, pp. 943-948, 2016.
- [6] C-Y. Lee, W-J. Lee, Y-N. Wang e J-C. Gu, “Effects of Voltage Harmonics on the Electrical and Mechanical Performance of a Three-phase Induction Motor” *IEEE*, pp. 88-94, 1998.
- [7] S. Sahu, R. N. Dash, C. K. Panigrahu e B. Subudhi, “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.
- [8] C. B. Alves e E. B. Santos, “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.
- [9] S. M. Deckman e J. A. Pomilio, “Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS”, UNICAMP/FEEC/DSCE, Jul, 2009.
- [10] F. R. Garcia, “Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência”, *IESA S/A*. Acedido em 10 de Dezembro de 2018, em: http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicosePCap.pdf
- [11] Schneider/Procobre, Brasil (Março, 2003). Qualidade de energia Harmônicas. Workshop Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Acedido em 08 de Fevereiro de 2019, em: <https://eletricaes.com.br/downloads/qualidade-de-energia-harmonicosePCap.pdf>.
- [12] I. A. Pires. Harmônicos provocados por eletrônicos. O setor elétrico, 2010.