

Análise das Potências Elétricas em Sistemas Trifásicos Desequilibrados e Compensação da Potência Não Ativa

Marcelo Semensato*

*Instituto Federal de Goiás, GO, Brasil
(e-mail: marcelo.semensato@ifg.edu.br).

Abstract: The power loads in distribution networks are generally unbalanced, as these networks supply single-phase loads of different powers. Unbalanced three-phase loads consume active, reactive, and unbalance power according to IEEE Std 1459-2010. The effective power method is recommended by the standard for calculating power in unbalanced loads. The conventional method is not used to calculate the power in unbalanced loads, as it does not provide the unbalance power. This paper is a comparison between the conventional method and the effective methods of calculating power in unbalanced three-phase loads. And it compares the compensation of reactive power calculated by the conventional method with the compensation of non-active power calculated by the effective methods in unbalanced three-phase circuits. The objective is to show that in unbalanced systems it is necessary to calculate and compensate not only the reactive power but also the unbalance power for an ideal compensation.

Resumo: As cargas elétricas em redes de distribuição são geralmente desequilibradas, pois estas redes alimentam cargas monofásicas de potências diferentes. As cargas trifásicas desequilibradas consomem potência ativa, reativa e de desequilíbrio segundo IEEE Std 1459-2010. O método da potência efetiva é recomendado pela norma para o cálculo da potência em cargas desequilibradas. O método convencional não é empregado no cálculo da potência em cargas desequilibradas, pois não fornece a potência de desequilíbrio. Este artigo faz uma comparação entre o método convencional e os métodos efetivos de cálculo da potência em cargas trifásicas desequilibradas. E compara a compensação da potência reativa calculada pelo método convencional com a compensação da potência não ativa calculada pelos métodos efetivos em circuitos trifásicos desequilibrados. O objetivo é deixar claro que em sistemas desequilibrados é necessário calcular e compensar não apenas a potência reativa, mas também a potência de desequilíbrio para uma compensação ideal.

Keywords: Unbalanced three-phase loads, Unbalance power, Ideal compensation method, Effective power theory, P-q theory.

Palavras-chaves: Cargas trifásicas desequilibradas, Potência de desequilíbrio, Método de compensação ideal, Teoria da potência efetiva, Teoria p-q.

1. INTRODUÇÃO

As potências elétricas em um sistema trifásico simétrico e equilibrado já são bastante conhecidas. A potência ativa realiza trabalho e a reativa não realiza trabalho. A potência reativa fica oscilando na rede de energia elétrica, podendo ser compensada por elementos passivos (capacitores ou indutores). A potência ativa convencional e a potência reativa convencional são calculadas em (1) e (2), respectivamente, por fase. Sendo V e I o módulo da tensão e da corrente por fase na fonte trifásica, respectivamente. E φ a diferença angular entre esta tensão e corrente.

As cargas trifásicas desequilibradas consomem uma parcela de potência devido as componentes de desequilíbrio da corrente ou/e tensão. Esta potência, denominada de potência de desequilíbrio, apresenta uma parcela instantânea média e uma parcela instantânea alternada (Emanuel, 1993).

Pela equação (1) é possível identificar que a potência ativa é o produto de fasores em fase. Esta potência em sistemas

trifásicos simétricos e equilibrados é convertida em trabalho, mas em sistemas desequilibrados o cálculo em (1) apresenta uma fração correspondente à potência de desequilíbrio. A potência de desequilíbrio é trocada entre as fases do sistema trifásico e não realiza trabalho. O mesmo equivale à potência reativa em (2), pois apresenta uma parcela da potência de desequilíbrio que quando somada as outras duas fases do circuito desequilibrado se anula. O método convencional calcula a potência ativa e reativa trifásica (somando-se as potências (1) e (2) das fases), mas a potência de desequilíbrio é nula na somatória das potências das fases.

$$P_c = VI \cos \varphi \quad (1)$$

$$Q_c = VI \sin \varphi \quad (2)$$

A IEEE Std 1459-2010 (IEEE STD 1459-2010, 2010) define três métodos para calcular a potência aparente e o fator de

potência para sistemas simétricos e equilibrados: potência aritmética, potência vetorial e potência efetiva. Os três métodos tem o mesmo valor para sistemas equilibrados, mas valores distintos para sistemas desequilibrados. A norma recomenda o cálculo pelo método da potência efetiva em sistemas desequilibrados. As potências aritmética e vetorial, denominadas de potências convencionais, são baseadas no conceito físico obtido por (1) e (2). A potência vetorial é calculada, em (3), pela soma das potências complexas nas fases a , b e c de um sistema trifásico mostrado na Fig.1. Sendo I_a^* , I_b^* , e I_c^* o conjugado das correntes elétricas nas fases a , b e c , respectivamente, e R a resistência da linha de transmissão. As tensões nas fases a , b e c da fonte são V_a , V_b , e V_c , respectivamente.

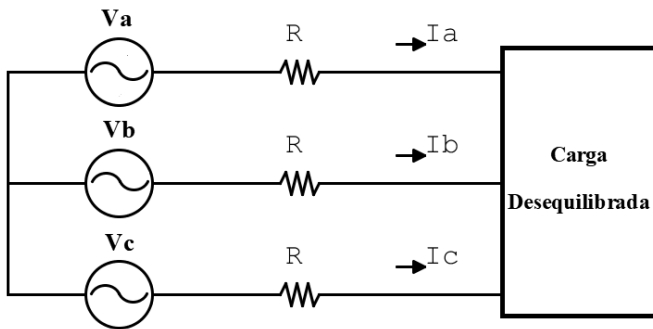


Fig. 1 Sistema trifásico simétrico e desequilibrado.

$$S_V = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* \quad (3)$$

Vários autores têm feito esforços para definir as potências elétricas de acordo com seus significados físicos em sistemas trifásicos desequilibrados e/ou com componentes harmônicas (Emanuel, 1993), (Czarnecki, 2005), (Watanabe, Aredes, 1998) e (Milanez, 1997).

Em (Czarnecki, 2005), o autor aponta falhas nos cálculos das potências em sistemas desequilibrados e/ou com harmônicas propostos por Budeanu e críticas as potências propostas por Fryze. As críticas à potência proposta por Fryze são principalmente pelo cálculo instantâneo, pois os compensadores reativos são calculados no domínio da frequência.

Em (Czarnecki, 2006), o autor afirma que o cálculo do valor real da potência é aquele que fornece o valor verdadeiro do fator de potência para a carga desequilibrada, ou seja, o valor de potência elétrica que representa as perdas elétricas nas linhas de energia. Portanto o autor reitera que o fator de potência somente é verdadeiro se calculado pela potência aparente efetiva, em (IEEE STD 1459-2010, 2010).

Embora o autor em (Czarnecki, 2006) admita correto o cálculo da potência aparente efetiva em (IEEE STD 1459-2010, 2010), o mesmo realiza os cálculos das potências elétricas de acordo com seus significados físicos pela teoria da potência baseada nos Componentes Físicos das Correntes (CFC).

A Teoria p-q é utilizada no cálculo do compensador do filtro ativo de potência (Watanabe, Aredes, 1998) e (Couto, Martins, Afonso, 2003). Pela Teoria p-q é possível calcular a potência ativa e a reativa instantaneamente. Por meio desta distinção das potências instantâneas é possível compensar a potência oscilante no sistema trifásico. Esta teoria será abordada neste artigo para comparar o significado físico desta com as potências no domínio da frequência, pois a Teoria p-q é amplamente utilizada na compensação de cargas desequilibradas, ou seja, está bem fundamentada.

O objetivo deste artigo é calcular as potências elétricas em sistemas trifásicos desequilibrados comparando diferentes métodos e realizar a compensação da potência não ativa pelo método da compensação ideal. O trabalho traz uma base teórica para a compensação de cargas desequilibradas em sistemas de distribuição e para o cálculo do fator de potência real do sistema. O artigo compara as potências definidas no domínio da frequência em (IEEE STD 1459-2010, 2010), em (Czarnecki, 2005) e pela teoria convencional em (3).

Em (Semensato, 2018), o autor mostra que os trabalhos na literatura não abordam a compensação ideal em redes de distribuição. A potência reativa é compensada, mas a potência de desequilíbrio é ignorada, o que provoca maiores perdas na rede. O autor analisa que na rede desequilibrada de média tensão as tensões nas barras trifásicas são praticamente simétricas, mesmo com um maior carregamento, mas as correntes são desequilibradas devido às cargas elétricas. Por isso os estudos deste artigo são direcionados a circuitos trifásicos simétricos e desequilibrados.

O artigo é dividido em seis seções. A segunda seção trata-se do cálculo das potências em sistemas desequilibrados. A terceira seção discorre sobre o método de compensação ideal para cargas trifásicas desequilibradas. A quarta seção apresenta os resultados dos casos simulados. A quinta e a sexta seção são as discussões e conclusões, respectivamente.

2. POTÊNCIAS ELÉTRICAS EM SISTEMAS TRIFÁSICOS DESEQUILIBRADOS

As teorias das potências abordadas nesta seção são a teoria da potência efetiva, a teoria da potência baseada nos CFC e a teoria p-q.

2.1 Teoria da potência efetiva

A teoria da potência efetiva foi conceituada por (Emanuel, 1993) e posteriormente incorporada na IEEE Std 1459-2010. A corrente eficaz equilibrada (I_e) definida pela teoria da potência efetiva representa as mesmas perdas elétricas nas linhas de transmissão que as correntes desequilibradas (I_a , I_b , e I_c) no circuito trifásico mostrado na Fig. 1, conforme (4) e (5).

$$3RI_e^2 = R(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) \quad (4)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}} \quad (5)$$

A potência aparente efetiva calculada na fonte para o sistema da Fig.1 é dado por (6). Sendo as tensões de fase (V_a, V_b e V_c) simétricas com magnitude V .

$$S_e = 3VI_e \quad (6)$$

A potência ativa efetiva (P_e) e reativa efetiva (Q_e) no circuito trifásico simétrico e desequilibrado são calculadas por (7).

$$S_e^+ = 3V_a I_a^{+*} = P_e + jQ_e \quad (7)$$

O fasor I_a^{+*} representa o conjugado da componente simétrica de sequência positiva da corrente elétrica na fase a .

A potência de desequilíbrio efetiva (D_e), referente às componentes simétricas das correntes desequilibradas (negativa e zero), é calculada em (8). A potência reativa efetiva e de desequilíbrio não realizam trabalho e podem ser compensadas (Emanuel, 2011). Essas são as potências oscilantes.

$$D_e = \sqrt{S_e^2 - P_e^2 - Q_e^2} \quad (8)$$

O cálculo do fator de potência efetivo é dado por (9).

$$fp_e = \frac{P_e}{S_e} \quad (9)$$

2.2 Componentes Físicas das Correntes

A teoria da potência baseada nos CFC define as correntes elétricas de acordo com seus significados físicos. A teoria é influenciada pela divisão das correntes de Fryze (Czarnecki, 2005).

A potência ativa e reativa no sistema trifásico simétrico e desequilibrado da Fig. 2 são calculadas pelas correntes nos elementos passivos do circuito, conforme (10) e (11), respectivamente. Sendo $R_a, R_b, e R_c$ as resistências e $X_a, X_b, e X_c$ as reatâncias das fases a, b e c , respectivamente, da carga elétrica trifásica.

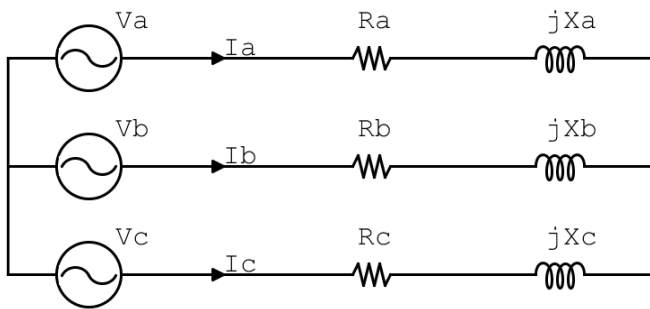


Fig. 2 Sistema trifásico simétrico com carga desequilibrada.

$$P_{CFC} = R_a I_a^2 + R_b I_b^2 + R_c I_c^2 \quad (10)$$

$$Q_{CFC} = X_a I_a^2 + X_b I_b^2 + X_c I_c^2 \quad (11)$$

A corrente de desequilíbrio é ortogonal à corrente ativa e à corrente reativa (Czarnecki, 2005), portanto a potência de desequilíbrio fornecida pela fonte simétrica é definida em (12).

$$D_{CFC} = \sqrt{S_{CFC}^2 - P_{CFC}^2 - Q_{CFC}^2} \quad (12)$$

A potência aparente S_{CFC} é definida em (6), sendo igual à potência aparente efetiva.

A teoria da potência baseada nos CFC calcula a potência ativa e reativa nos elementos passivos da carga elétrica. Para fechar o tetraedro das potências é calculada a potência de desequilíbrio na carga. Esta potência não realiza trabalho e pode ser compensada. A dificuldade deste método é obter os valores dos elementos passivos. As potências nas redes elétricas são na maioria do tipo potência constante, o que dificulta os cálculos por este método, diferentemente da teoria da potência efetiva.

2.3 Teoria p-q

A teoria p-q foi proposta por (Akagi, Kanazawa, Nabae, 1984) com o objetivo de calcular a potência ativa e reativa instantaneamente no sistema trifásico para a compensação das potências que não realizam trabalho (não ativa). A teoria p-q baseia-se na transformada de Clarke. A transformada de Clarke consiste na transformação das tensões trifásicas instantâneas v_a, v_b e v_c nos eixos α, β e c , respectivamente, para os eixos ortogonais fixos α e β , resultando em v_α e v_β , respectivamente. O eixo α equivale ao eixo a . A mesma transformação é válida para a corrente elétrica, resultando em i_α e i_β .

A potência ativa e reativa instantânea são calculadas por (13) e (14), respectivamente. O conceito destas potências segue o conceito físico da potência convencional. A potência ativa é calculada pelos valores instantâneos da tensão e corrente em fase e a potência reativa pelos valores ortogonais da tensão e corrente instantâneas.

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta = \bar{p} + \tilde{p} \quad (13)$$

$$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta = \bar{q} + \tilde{q} \quad (14)$$

As potências podem ser separadas em valor médio ($\bar{p}$ e $\bar{q}$) e valor oscilante ($\tilde{p}$ e $\tilde{q}$). A única parcela que realiza trabalho é a potência ativa média ($\bar{p}$) que representa a potência ativa trifásica da teoria convencional (parte real de S_V) e a potência ativa dos métodos efetivos (Seção 2.1 e 2.2). A potência ativa

oscilante ($\tilde{p}$) é uma parcela da potência ativa que não realiza trabalho. Esta parcela de potência é trocada entre as fases do sistema. A potência $\tilde{p}$, juntamente com a potência oscilante $\tilde{q}$, corresponde ao desequilíbrio das cargas (potência de desequilíbrio instantânea) e pode ser compensada. O valor médio da potência reativa instantânea, ($\bar{q}$), representa a potência reativa trifásica da teoria convencional (parte imaginária de S_V) e a potência reativa dos métodos efetivos. Nos filtros ativos as potências $\tilde{p}$, $\tilde{q}$ e $\bar{q}$ são compensadas para a correção do fator de potência.

3. MÉTODO DA COMPENSAÇÃO IDEAL

A compensação da potência não ativa em cargas trifásicas desequilibradas é obtida pelo método da compensação ideal (Semensato, 2018). A compensação é realizada pela inserção de compensadores passivos (capacitores e/ou indutores) em paralelo com a carga.

Os compensadores passivos injetam correntes na rede elétrica em oposição as correntes de sequência zero e negativa para a compensação do desequilíbrio e em oposição à parte imaginária da componente de sequência positiva da corrente para a compensação da potência reativa. Após a compensação ideal, o fator de potência visto pela fonte de alimentação é unitário.

A compensação da componente de sequência negativa da corrente e da potência reativa para a carga desequilibrada conectada em delta é realizada por meio de compensadores passivos ligados em delta, mostrado na Fig. 3, e os compensadores calculados por (15), (16) e (17). A carga trifásica e os compensadores são dados em Siemens (S). Sendo G e B a condutância e a susceptância, respectivamente.

A compensação da componente simétrica de sequência zero da corrente elétrica e da potência reativa para a carga desequilibrada conectada em estrela (centro-estrela ligado ao neutro) é realizada por meio de compensadores passivos conectados em estrela com centro-estrela ligado ao neutro, mostrado na Fig. 4, e os compensadores calculados por (18), (19) e (20). A carga trifásica e os compensadores são dados em Siemens (S).

A compensação da potência de desequilíbrio e reativa pode ser realizada nas barras da rede elétrica trifásica pelos compensadores passivos.

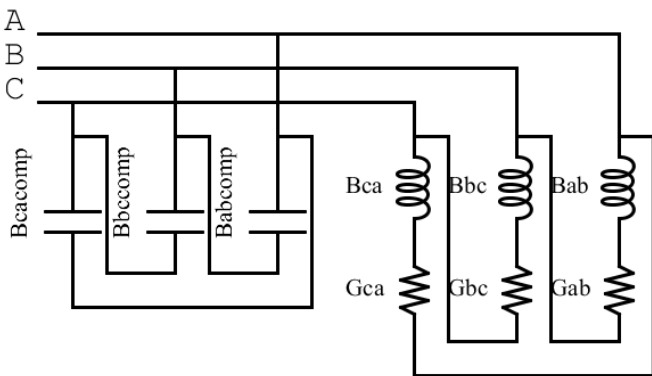


Fig. 3 Compensação para a carga desequilibrada em delta.

$$B_{abcomp} = -B_{ab} + \frac{G_{bc}}{\sqrt{3}} - \frac{G_{ca}}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

$$B_{bccomp} = -B_{bc} - \frac{G_{ab}}{\sqrt{3}} + \frac{G_{ca}}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

$$B_{caccomp} = -B_{ca} + \frac{G_{ab}}{\sqrt{3}} - \frac{G_{bc}}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

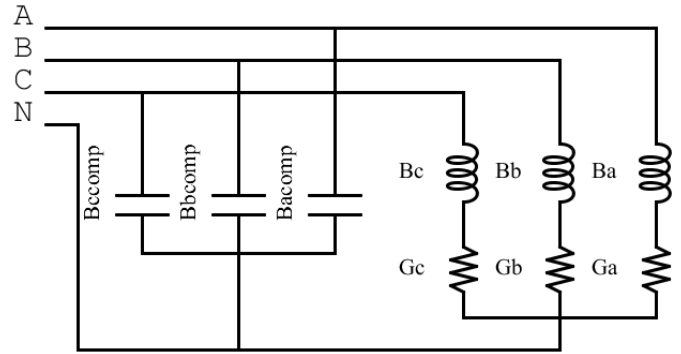


Fig. 4 Compensação para a carga desequilibrada em estrela.

$$B_{acomp} = -B_a + \frac{G_b}{\sqrt{3}} - \frac{G_c}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

$$B_{bcomp} = -B_b - \frac{G_a}{\sqrt{3}} + \frac{G_c}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

$$B_{ccomp} = -B_c + \frac{G_a}{\sqrt{3}} - \frac{G_b}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

Nota-se que os compensadores (15) a (20) compensam os elementos reativos (primeira parcela das equações) e o desequilíbrio devido aos componentes resistivos (segunda e terceira parcela).

A compensação da carga em estrela com centro-estrela isolado é descrita em (Semensato, 2018).

4. SIMULAÇÕES

Nesta seção são simulados circuitos trifásicos simétricos e desequilibrados. Para cada caso são obtidas as potências elétricas pela teoria da potência efetiva, pela teoria CFC, pela teoria convencional e comparadas. A compensação da potência reativa e de desequilíbrio é realizada pelo método da compensação ideal. O software MatLab é utilizado para a simulação.

4.1 Caso 1

Na Fig. 5 é apresentado um circuito trifásico com carga desequilibrada ligada em delta. As cargas são dadas em Ω e a fonte é simétrica com tensão eficaz de fase igual a 2400 V.

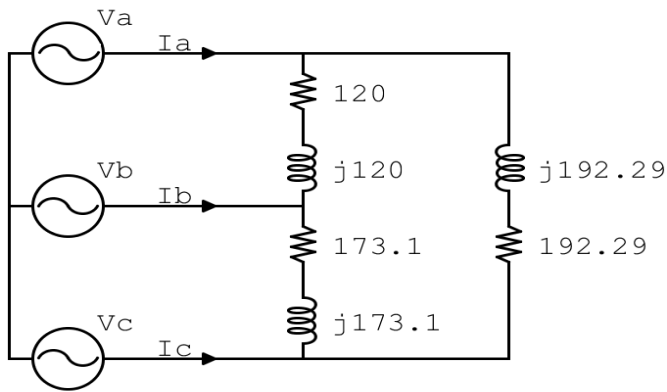


Fig. 5 Circuito trifásico com carga desequilibrada em delta.

As potências elétricas pela teoria convencional, pela teoria da potência baseado nos CFC e pela potência efetiva são calculadas na fonte trifásica do circuito da Fig. 5 e apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Potências elétricas no circuito trifásico indutivo.

	Potência Convencional	Potência CFC	Potência Efetiva
Potência Aparente (VA)	235955,10	238579,40	238579,40
Potência Ativa (W)	166845,40	166845,40	166845,40
Potência Reativa (VAr)	166845,40	166845,40	166845,40
Potência de Desequilíbrio (VA)	-	35288,80	35288,80

A potência aparente, ativa, reativa e de desequilíbrio da teoria CFC e da teoria da potência efetiva são iguais. As teorias se equivalem.

A potência aparente convencional apresenta um erro de 1,10 % em relação à potência aparente CFC e efetiva. A potência ativa e a reativa convencional são iguais às da potência efetiva e CFC, pois no cálculo convencional (soma das potências complexas por fase) a potência de desequilíbrio é anulada. A potência de desequilíbrio é trocada entre as fases do sistema trifásico desequilibrado e deve ser compensada, mesmo que no cálculo convencional não seja contabilizada. A diferença entre a potência aparente efetiva e a potência aparente convencional está relacionada à potência de desequilíbrio, de acordo com (8).

A potência ativa convencional calculada por (1) na fase *a* do circuito da Fig.5 é 66280 W. A potência ativa efetiva calculada na fase *a* é 55615 W e a potência de desequilíbrio

na fase *a* calculada pela teoria da potência efetiva é 10665 VA. Somando a potência ativa e a potência de desequilíbrio na fase *a* da teoria efetiva (55615+10665) é igual à potência ativa da teoria convencional (66280 W). A potência trifásica de desequilíbrio no cálculo da teoria convencional, em (3), se cancela, pois a potência de desequilíbrio é trocada entre as fases. Portanto, o cálculo da potência ativa trifásica da teoria convencional, em (3), resulta na potência ativa trifásica da teoria efetiva (55615 W multiplicado por três).

A potência reativa e a potência de desequilíbrio da carga trifásica no circuito da Fig. 5 são compensadas pelo método da compensação ideal, ilustrado na Fig. 6. Estas potências não ativa são compensadas por capacitores ligados em delta calculados em (15), (16) e (17). São colocadas pequenas resistências em série com os capacitores representando as perdas elétricas. A compensação apenas da potência reativa não leva o fator de potência à unidade, diferentemente da compensação ideal.

As correntes elétricas $I_a, I_b, e I_c$ antes da compensação são 34,76 A, 36,12 A, e 27,96 A, respectivamente. Depois da compensação ideal as correntes nas fases são 23,40 A, 23,58 A, e 23,44 A, respectivamente. Após a compensação apenas da potência reativa as correntes nas fases são 25,13 A, 25,91 A, e 20,21 A, respectivamente. O fator de potência efetivo antes da compensação é 0,7, depois da compensação ideal é unitário e com a compensação apenas da potência reativa é 0,97.

Nota-se que a potência dos compensadores para a compensação ideal é igual à potência reativa da teoria convencional, CFC e efetiva. A potência dos compensadores é calculada somando (15), (16) e (17) e multiplicando por V_L^2 . Sendo V_L a tensão de linha.

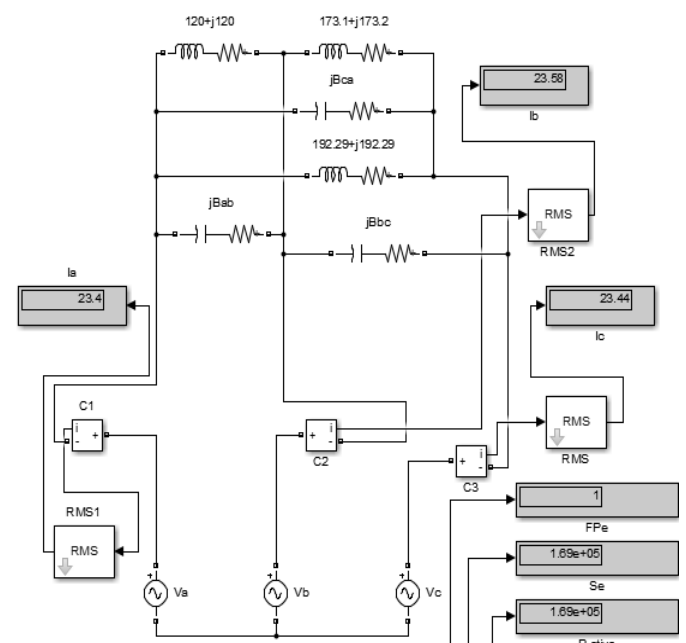


Fig. 6 Compensação com carga conectada em delta.

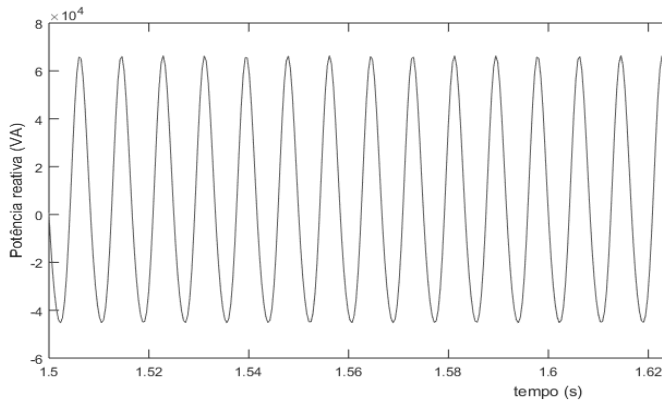


Fig. 7 Potência reativa na fase a (Teoria p-q).

No circuito trifásico da Fig. 5, a potência ativa média, $\bar{p}$, calculada utilizando o software MatLab/Simulink equivale a 166841 W. A potência reativa média, $\bar{q}$, equivale a 166845,30 VAR. A potência ativa e reativa média da teoria p-q é equivalente a potência ativa e reativa da teoria da potência efetiva. Pela teoria p-q é possível observar que a potência ativa oscilante ($\tilde{p}$) e a potência reativa oscilante ($\tilde{q}$) representam a potência devido ao desequilíbrio da carga trifásica. As potências $\tilde{q}$, $\tilde{p}$ e $\tilde{q}$ podem ser compensadas instantaneamente por filtros ativos de potência correspondentemente a compensação das potências Q_e e D_e no domínio da frequência pelo método da compensação ideal.

Embora q seja definida como potência reativa instantânea, e não realiza trabalho, o significado físico desta potência é diferente da potência reativa da teoria da potência efetiva. A potência q nas fases do sistema trifásico pode apresentar um valor médio correspondente à potência de desequilíbrio da carga trifásica. A potência reativa instantânea, q , na fase a do circuito da Fig. 5 é mostrada na Fig. 7. O valor médio da potência reativa instantânea na fase a é 5333 VA. A potência ativa instantânea, p , na fase a do circuito da Fig. 5 é mostrada na Fig. 8. O valor médio da potência ativa instantânea na fase a é 60946,30 VA. Somando as potências médias na fase a resulta em 66279,30 VA, que é a potência ativa média calculada por (1) nesta fase.

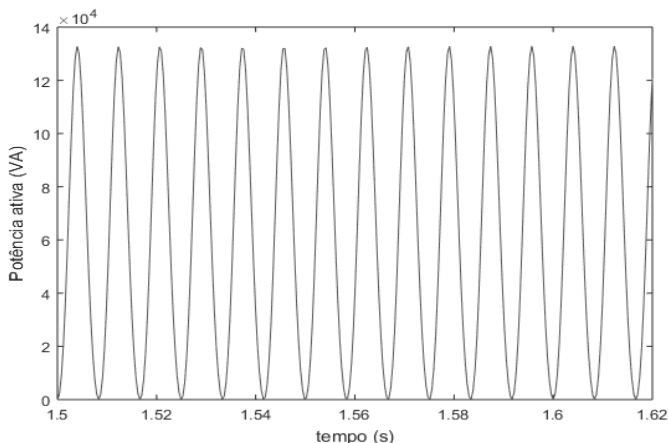


Fig. 8 Potência ativa na fase a (Teoria p-q).

4.2 Caso 2

Na Fig. 9 é apresentado um circuito trifásico com carga desequilibrada ligada em estrela com centro-estrela isolado. As cargas são dadas em Ω e a fonte é simétrica com tensão eficaz de fase igual a 1000 V.

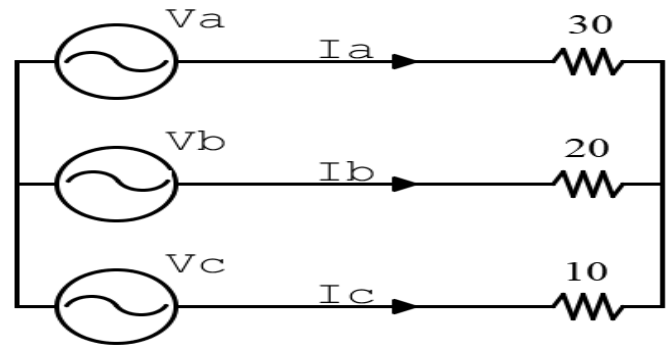


Fig. 9 Circuito trifásico com carga desequilibrada em estrela.

A potência elétrica convencional, a potência baseada nos CFC e a potência efetiva são calculadas no circuito da Fig. 9 e apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Potências elétricas no circuito trifásico resistivo.

	Potência Convencional	Potência CFC	Potência Efetiva
Potência Aparente (VA)	163636,40	170318,13	170318,13
Potência Ativa (W)	163636,40	163636,40	163636,40
Potência Reativa (VAR)	0	0	0
Potência de Desequilíbrio (VA)	-	47237,75	47237,75

A potência aparente, ativa, reativa e a potência de desequilíbrio da teoria CFC e da teoria da potência efetiva são iguais. A potência aparente convencional apresenta um erro de 3,92 % em relação à potência aparente efetiva e a CFC. Esta diferença refere-se à potência de desequilíbrio, de acordo com (8) e (12).

A potência de desequilíbrio no circuito da Fig. 9 é compensada pelo método da compensação ideal, ilustrado na Fig. 10. Os compensadores são conectados em delta. São colocadas pequenas resistências em série com os compensadores para representarem as perdas elétricas. As correntes I_a , I_b , e I_c antes da compensação são 41,66 A, 56,77

A, e 68,63 A, respectivamente. As correntes após a compensação são 55 A, 55,01 A, e 55,40 A, respectivamente. O fator de potência efetivo antes da compensação é 0,97 e depois da compensação é unitário.

A potência ativa média, $\bar{p}$, calculada pelo MatLab/Simulink para o circuito trifásico resistivo da Fig. 9 equivale a 163635,78 W. A potência reativa média, $\bar{q}$, equivale a 0 VAR. A potência ativa e reativa média da teoria p-q é igual a potência ativa e reativa da teoria da potência efetiva.

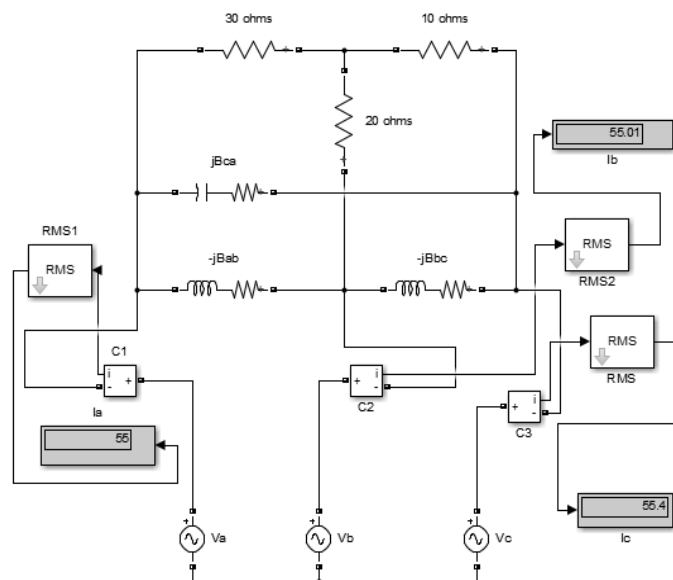


Fig.10 Compensação da carga puramente resistiva em estrela.

4.3 Caso 3

Na Fig. 11 é apresentado um circuito trifásico com carga desequilibrada ligada em estrela com centro-estrela ligado ao neutro. As cargas são dadas em Ω e a fonte é simétrica com tensão eficaz de fase igual a 2400 V.

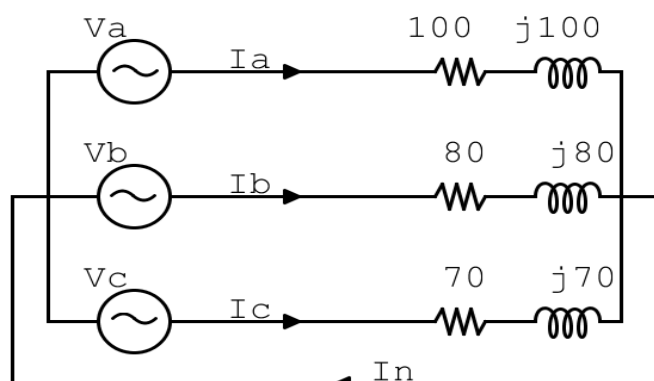


Fig. 11 Carga trifásica conectada em estrela com neutro.

As potências elétricas pela teoria da potência elétrica convencional, pela teoria da potência baseada nos CFC e pela potência efetiva são calculadas no circuito da Fig. 11 e apresentadas na Tabela 3.

A potência aparente, ativa, reativa e a potência de desequilíbrio da teoria CFC e da teoria da potência efetiva são iguais. A potência aparente convencional apresenta um erro de 1,01 % em relação à potência aparente CFC e a efetiva. Esta diferença refere-se à potência de desequilíbrio, pois esta potência não é calculada na teoria convencional.

Tabela 3. Potências no circuito trifásico com neutro.

	Potência Convencional	Potência CFC	Potência Efetiva
Potência Aparente (VA)	149830	151360	151360
Potência Ativa (W)	105940	105940	105940
Potência Reativa (VAR)	105940	105940	105940
Potência de Desequilíbrio (VA)	-	21524	21524

A potência reativa e de desequilíbrio no circuito da Fig. 11 são compensadas pelo método da compensação ideal, ilustrado na Fig. 12. Os compensadores são conectados em estrela com centro-estrela ligado ao neutro e em delta para compensação das componentes de sequência zero e negativa da corrente e para compensação da potência reativa. São colocadas pequenas resistências em série com os compensadores para representarem as perdas elétricas. As correntes elétricas I_a, I_b, I_c e I_n antes da compensação são 16,97 A, 21,21 A, 24,24 A e 6,33 A, respectivamente. As correntes após a compensação ideal são 14,82 A, 14,98 A, 14,92 A e 0,15 A, respectivamente. As correntes após a compensação apenas da potência reativa são 12,12 A, 15,19 A, 17,39 A e 4,58 A, respectivamente. O fator de potência efetivo antes da compensação é 0,7, depois da compensação ideal é unitário e depois da compensação apenas da potência reativa é 0,99.

A potência ativa média, $\bar{p}$, calculada pelo MatLab/Simulink para o circuito trifásico da Fig. 11 equivale a 105942 W. A potência reativa média, $\bar{q}$, equivale a 105942 VAR. A potência ativa e reativa média da teoria p-q é igual a potência ativa e reativa da teoria da potência efetiva (e igual a da teoria convencional e CFC).

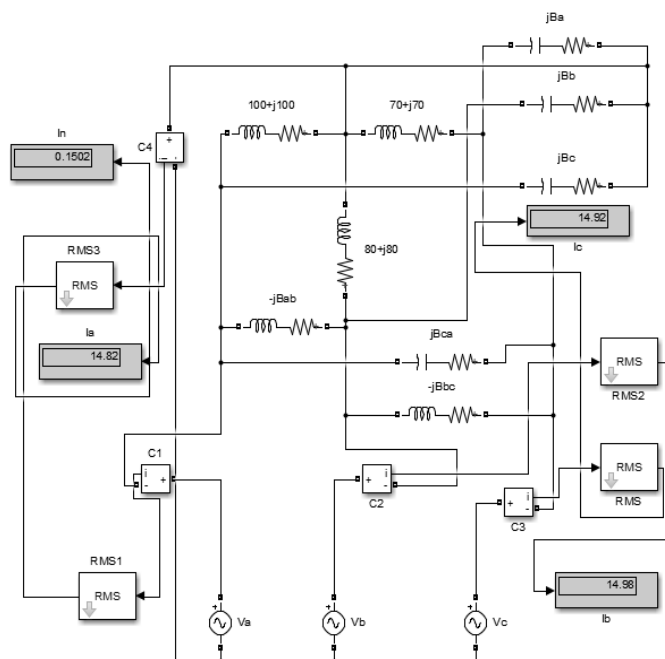


Fig. 12 Compensação da carga trifásica conectada ao neutro.

5. DISCUSSÕES

Nos casos analisados é possível constatar que a potência CFC e efetiva abrange a potência de desequilíbrio, diferentemente da potência convencional. A potência aparente CFC e efetiva são obtidas pela corrente elétrica efetiva. A potência reativa e de desequilíbrio não realizam trabalho e podem ser compensadas. A compensação da potência reativa e a de desequilíbrio em redes desequilibradas são necessárias para uma efetiva correção do fator de potência, ou seja, para a minimização das perdas nas linhas elétricas. Nos casos analisados a compensação ideal resultou no fator de potência efetivo unitário, enquanto a compensação apenas da potência reativa não resultou na unidade. É possível compensar a potência de desequilíbrio em circuitos puramente resistivos como no caso 2. Em (Pomilio, Deckmann, 2009) é dito que a compensação em redes desequilibradas pode ser realizada pela alocação de capacitores equilibrados para não aumentar o desequilíbrio, mas como discutido neste artigo, a compensação ideal é o melhor método. A teoria p-q possui significado físico diferente da teoria da potência efetiva. Embora ambas calculem as potências que não realizam trabalho, a potência reativa instantânea nas fases do sistema elétrico pela teoria p-q não apresenta valor médio nulo quando existe desequilíbrio nas cargas. A representação gráfica da teoria p-q em (Watanabe, Aredes, 1998, Fig. 3) está associada ao significado físico da potência convencional. A compensação ideal no caso 3 compensa a componente de sequência zero da corrente, portanto a corrente no neutro é compensada.

6. CONCLUSÃO

A potência reativa e de desequilíbrio devem ser calculadas corretamente e compensadas em sistemas elétricos de potência para uma efetiva correção do fator de potência.

AGRADECIMENTO

Agradeço ao Instituto Federal de Goiás pelas condições oferecidas em prol da pesquisa acadêmica.

REFERÊNCIAS

- Akagi, H., Kanazawa, Y. e Nabae, A. (1984). "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, IA-20(3): 625-630.
- Couto, E. F., Martins, J. S., Afonso, J. L. (2003). "Simulation Results of a Shunt Active Power Filter with Control Based on p-q Theory," *ICREPQ*, Espanha, p. 1-6.
- Czarnecki, L. S. (2005). "Currents' Physical Components (CPC) in Circuits with Nonsinusoidal Voltages and Currents Part 1: Single-Phase Linear Circuits," *Electrical Power Quality and Utilisation*, Journal, vol. XI, no. 2, p. 3-14.
- Czarnecki, L. S. (2006). "Currents' Physical Components (CPC) in Circuits with Nonsinusoidal Voltages and Currents Part 2: Three-Phase Three-Wire Linear Circuits," *Electrical Power Quality and Utilisation*, Journal, vol. XII, no. 1, p. 3-13.
- Emanuel, A. E. (1993). "On The Definition of Power Factor and Apparent Power In Unbalanced Polyphase Circuits with Sinusoidal Voltage and Currents," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8, no. 3, p. 841-852.
- Emanuel, A. E. (2011). "Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow," Wiley-IEEE Press.
- IEEE STD 1459-2010. (2010). "IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," *IEEE*, p.1-40.
- Milanez, D. L. (1997). "New concepts of the power received by d e a l energy storage elements: the instantaneous complex power approach," *Proceedings of the 39th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, USA, p. 1038-1041.
- Pomilio, J. A., Deckmann, S. M. (2009). "Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS," Notas de aula, Cap. 6, pag. 17, UNICAMP/FEEC.
- Semensato, M. (2018). "Alocação de capacitores em redes de distribuição desequilibradas para minimizar as perdas de energia elétrica e o desequilíbrio," Tese de doutorado, Unesp, São Paulo, p. 1-136.
- Watanabe, E. H., Aredes, M. (1998). "Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações - Filtros Ativos e FACTS," *CBA* 98, p. 1-21.