

AVALIAÇÃO DA COMPENSAÇÃO DE REATIVOS NO CÁLCULO DE POTÊNCIA EM CONDIÇÕES NÃO-SENOIDAIIS

RODRIGO DE A. COELHO¹, GEORGE V. R. XAVIER¹, ÉRICA M. LIMA², NÚBIA S. D. BRITO³, GEORGE R. S. DE LIRA³

¹Mestrando do Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica – PPgEE/UFCG

²Doutoranda do Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica – PPgEE/UFCG

³Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande – DEE/UFCG
Av. Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, 58.429-900
Campina Grande, Paraíba, Brasil

E-mails: {rodrigo.almeida, george.xavier, erica.lima}@ee.ufcg.edu.br;
{nubia, george}@dee.ufcg.edu.br

Abstract— The incessant dissemination of equipment that uses power electronics and non-linear loads in power systems have made the voltage and current signals increasingly distant from the ideal sine wave shape and as consequence, the traditional power calculation is no longer satisfactory. Because of that, several theories of electric power calculation have been proposed, however, until now is no theory that fully satisfies these signals. In addition, the search for the minimization of reactivities in the system resulted in the development of several techniques of reactive power compensation. This work is in this context and realizes a study to evaluate the impact of reactive compensation on the power calculation according to different power theories for non-sinusoidal signals. For this purpose, two electrical circuit scenarios were adopted for the compensation of reactive and quantification of the portions of power inherent to each theory. The results showed that the reactive compensation minimizes the reactive power, however it can increase the residual portion of the non-active power of the system.

Keywords— non-sinusoidal systems, power quality, definitions of powers, reactive power compensation, power theories.

Resumo— A disseminação incessante de equipamentos que utilizam eletrônica de potência e de cargas não-lineares nos sistemas elétricos de potência têm tornado os sinais de tensão e corrente cada vez mais distantes da forma senoidal ideal e como consequência, o cálculo tradicional da potência não é mais satisfatório. Em virtude disso, diversas teorias de cálculo de potência elétrica têm sido propostas, entretanto, até o momento ainda não existe uma teoria que satisfaça por completo tais sinais. Ademais, a busca pela minimização de reativos no sistema resultou no desenvolvimento de diversas técnicas de compensação de potência reativa. Este trabalho se insere neste âmbito e realiza um estudo para avaliar o impacto da compensação de reativos no cálculo da potência elétrica, de acordo com diferentes teorias de potência para sinais não-senoidais. Para este propósito, dois cenários de circuitos elétricos foram adotados para a compensação de reativos e quantificação das parcelas de potência inerentes a cada teoria. Os resultados mostraram que a compensação de reativos minimiza a potência reativa, mas pode aumentar a parcela residual de potência não-ativa do sistema.

Palavras-chave— sistemas não senoidais, qualidade da energia elétrica, definições de potência, compensação de reativos, teorias de potência.

1 Introdução

Os conceitos e definições de potência para sistemas de corrente alternada em condições senoidais são bem estabelecidos e aceitos, contudo, para condições não-senoidais, diversas definições de potência têm sido propostas e, até o momento, não existe uma unanimidade (Akagi *et al.*, 2007). As distinções entre as diversas teorias estão intimamente relacionadas com o objetivo para o qual foram desenvolvidas, com cada uma delas apresentando vantagens e desvantagens conforme o campo de aplicação, interpretação e significado físico (Marafão, 2004).

Em 1982, Steinmetz constatou em um experimento que $S \neq \sqrt{P^2 + Q^2}$, o que motivou o desenvolvimento de novas definições de potência (Czarnecki, 2016). Deste modo, os componentes harmônicos nos sinais de tensão e corrente passaram a ter uma importância na análise. As correntes harmônicas, provenientes principalmente da presença de cargas não-lineares, constituem um grande problema nos sistemas

elétricos de potência (SEP). Portanto, a redução dos níveis de distorção harmônica constitui uma ação crucial na busca pela melhoria da Qualidade da Energia Elétrica (QEE), o que tem motivado estudos e pesquisas desde a disseminação da transmissão de energia elétrica em corrente alternada (Arrilaga e Watson, 2003).

Uma das técnicas para a compensação de harmônicos no sistema é a utilização de filtros ativos, os quais também podem reduzir a quantidade de reativos no SEP e simetrizar um sistema trifásico. A depender da estratégia de controle, todas essas funções podem ser executadas em conjunto (Maciazek, 2011).

Isto posto, a motivação deste trabalho foi avaliar o impacto de três técnicas de compensação de reativos no cálculo de potência segundo diferentes definições para sistemas não-senoidais. Deste modo, o artigo apresenta um comparativo da aplicação das teorias de potência desenvolvidas por Akagi *et al.* (1983), Czarnecki (1985, 1988) e pelo grupo de estudos do IEEE para situações não-senoidais (2010). O interesse é verificar a sensibilidade das teorias de potência à minimização de reativos em um circuito.

Para apresentar o estudo realizado, o trabalho foi organizado em cinco seções, incluindo esta seção introdutória. Na Seção 2 são apresentados os conceitos gerais vinculados à potência elétrica e à compensação de reativos. Os circuitos e as ferramentas utilizadas são expostos na Seção 3, seguida da apresentação e discussão dos resultados na Seção 4 e, por fim, as conclusões do estudo na Seção 5.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Potência elétrica

Em um SEP ideal, a potência instantânea é calculada da seguinte forma:

$$p(t) = v(t)i(t) = 2VI\sin(\omega t)\sin(\omega t - \theta), \quad (1)$$

em que: V e I são os valores eficazes de tensão e corrente, respectivamente; ω é a frequência, em rad/s, dos sinais; e θ é o defasamento entre os sinais de tensão e corrente.

A potência $p(t)$ pode ser decomposta em duas parcelas, denominadas “potência ativa” (P), e “potência reativa” (Q):

$$P = V \cdot I \cdot \cos(\theta), \quad (2)$$

$$Q = V \cdot I \cdot \sin(\theta). \quad (3)$$

Essas equações são adequadas apenas para circuitos senoidais e com cargas lineares (Elgerd, 1970). Do contrário, outras definições devem ser adotadas.

Os primeiros trabalhos que propuseram novas formas de cálculo de potência em condições não senoidais foram os de: Budeanu (1927), que propôs um método baseado em séries de Fourier para cálculo de potência em sistemas monofásicos contendo formas de onda distorcidas; e Fryze (1934), que propôs definições de potência baseadas na decomposição da corrente e nos valores eficazes da tensão e corrente.

A análise da literatura especializada mostrou que ao longo dos anos várias teorias têm sido propostas e que há uma dissensão entre elas. Constatou-se que a maioria das teorias de potência se concentra na decomposição da corrente ou da potência aparente. As teorias geralmente se dedicam a quantificar a parcela residual de potência não-ativa (RES) e de corrente (I_{RES}) (Filipski, 1993):

$$S^2 = P^2 + Q^2 + RES^2, \quad (4)$$

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 + I_{RES}^2, \quad (5)$$

em que, I_a e I_r representam as parcelas ativa e reativa da corrente, respectivamente.

O resumo de cada uma das teorias de potência utilizadas neste trabalho é apresentado a seguir:

A) Akagi et al (1983)

Akagi et al. (1983) desenvolveram um trabalho que introduziu um novo conceito chamado “potência imaginária instantânea”. A princípio, a teoria abrangia apenas sistemas trifásicos a três fios, contudo, em

trabalho posterior (Akagi et al., 1999), os autores a ampliaram para contemplar a presença do quarto fio.

Formulada no domínio do tempo, a teoria ficou conhecida como “Teoria pq”, a qual se baseia na transformação de coordenadas, das tensões e correntes ($a, b, c \rightarrow \alpha, \beta, 0$). Nas novas coordenadas, a potência é decomposta em “potência real instantânea” (associada à potência ativa) e “potência imaginária instantânea” (associada às interações de energia entre as fases do sistema). Infelizmente, essa transformação provoca perda de informações importantes para a associação das grandezas elétricas a fenômenos físicos. Não obstante, esta teoria é muito utilizada até hoje, sendo aplicada principalmente na compensação de reativos.

B) Czarnecki (1985)

A Teoria dos Componentes Físicos da Corrente – ou Teoria CPC – começou a ser desenvolvida no ano de 1985 (Czarnecki, 1985) e foi ampliada para sistemas trifásicos em 1988 (Czarnecki, 1988). O autor se baseou na definição de corrente ativa de Fryze, a qual assume o formato de onda da tensão. Essa teoria é fundamentada no comportamento de correntes ortogonais associadas a alguns fenômenos físicos da carga.

Em sistemas trifásicos, além das potências ativa e reativa, Czarnecki definiu mais duas componentes de potência, a saber:

- Potência de dispersão (D_s): associada à variação da condutância em função da frequência;
- Potência de desequilíbrio (D_u): associada à assimetria dos circuitos trifásicos.

A formulação matemática da Teoria CPC é complexa e efetuada no domínio da frequência. Além disso, a compensação das parcelas de corrente, exceto a corrente ativa, é dificultada pela necessidade de compensadores muito complexos.

C) IEEE Std. 1459 (2010)

Na década de 1990, o IEEE definiu um grupo de trabalho para situações não-senoidais, liderado por Alexander Eigeles Emanuel, que propôs em 2000 uma nova teoria de potências (IEEE Std. 1459, 2000), atualizada posteriormente em 2010 (IEEE Std. 1459, 2010). Esta teoria sugere, de maneira similar ao proposto por Budeanu, a decomposição da potência instantânea em componentes ativa, reativa e de distorção:

- Potência de distorção da corrente (D_{el}): associada aos harmônicos presentes na corrente;
- Potência de distorção da tensão (D_{ev}): atrelada às correntes harmônicas presentes na tensão;
- Potência aparente harmônica (S_{eH}): relacionada aos componentes ativos e reativos gerados por harmônicos.

Para sistemas trifásicos, são calculados valores equivalentes para tensão e corrente que se referem a um circuito equilibrado fictício, cujas perdas são iguais às do circuito desequilibrado. Apesar de ser uma teoria suportada pelo IEEE, ela não é consenso na comunidade científica, pois não fornece significado físico às componentes de potência.

Na Tabela 1 é apresentado um resumo das características das teorias de potência abordadas neste trabalho, as quais se referem a:

- I. Aplicabilidade em sistemas monofásicos (M) e/ou trifásicos (T);
- II. Equacionamento no domínio do tempo (t) ou da frequência (f);
- III. Especificação de carga (potência reativa positiva ou negativa);
- IV. Parcela residual de potência não-ativa (*RES*).

Tabela 1. Características das teorias de potência.

Definição	Característica			
	I	II	III	IV
Senoidal	M, T	f	Sim	-
Akagi <i>et al.</i>	T	t	Sim	-
Czarnecki	M, T	f	Não	$\sqrt{D_s^2 + D_u^2}$
IEEE Std. 1459	M, T	f	Sim	$\sqrt{D_{el}^2 + D_{ev}^2 + S_{eh}^2}$

2.2 Compensação de reativos

A compensação de reativos constitui um conjunto de técnicas, métodos e equipamentos que busca obter um melhor aproveitamento do SEP. Por meio do controle adequado da potência reativa, a tensão do sistema pode ser mantida dentro da faixa recomendada. Além disso, o fluxo de reativos pode ser minimizado e a potência total fornecida pelas fontes geradoras pode ser reduzida significativamente. Em geral, o excesso de reativos no sistema é resultante da atividade de motores de indução, transformadores de potência, dispositivos de eletrônica de potência e cargas não-lineares que injetam harmônicos da frequência fundamental na rede e implicam em formas de onda distorcidas. A compensação de reativos pode ser feita via:

- **Filtros passivos:** constituídos de elementos passivos (resistores, indutores e capacitores) que sintetizam a filtragem de determinadas frequências dos sinais. No entanto, nem todos os harmônicos presentes na tensão e os gerados na carga são sintonizados em filtros passivos.
- **Filtros ativos:** constituídos usualmente de conversores CC-CA, os quais são capazes de produzir sinais com as mais diversas formas de onda responsáveis por compensar qualquer parcela causadora de distorções de sinal (Silva *et al.*, 2001). Nesse sentido, a compensação ativa provê resultados diretamente relacionados à tensão/corrente que se quer compensar.

Para compensar a corrente, as técnicas de compensação se baseiam geralmente no esquema ilustrado na Figura 1.

Nesse esquema, o compensador tem como função minimizar os harmônicos da corrente ocasionados por uma carga não-linear, injetando uma corrente de compensação baseada nos valores de corrente proveniente da carga, de modo que a corrente na fonte de tensão possua a menor distorção possível.

As técnicas de compensação de reativos avaliadas neste trabalho são brevemente apresentadas a seguir.

Estas estratégias são baseadas na Teoria pq, na Teoria CPC e na idealidade da definição de potência elétrica do caso senoidal.

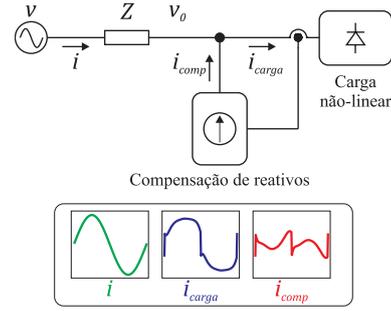


Figura 1. Compensação da corrente reativa.

A) Técnica pq

Nessa técnica, as tensões e correntes são transformadas para as coordenadas $\alpha, \beta, 0$ mediante (6) e (7):

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Esta técnica é empregada quando se deseja que a fonte forneça apenas a potência real instantânea (p). Para tanto, o compensador deve fornecer a potência imaginária instantânea (q). Esta compensação é baseada na proposta de Aredes e Watanabe (1995), sendo as correntes na fonte, para essas condições, dadas por:

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha} \\ i_{f\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}, \quad (8)$$

em que $p = v_0 i_0 + v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta$.

Portanto, as correntes que devem ser produzidas no compensador são da forma:

$$\begin{bmatrix} i_{c0} \\ i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha - i_{f\alpha} \\ i_\beta - i_{f\beta} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

e, nas coordenadas abc,

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c0} \\ i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$i_{cn} = -i_{ca} - i_{cb} - i_{cc}. \quad (11)$$

B) Técnica CPC

Aplicada quando se deseja que a fonte forneça apenas a corrente ativa, segundo a Teoria CPC, conforme (12):

$$\begin{bmatrix} i_{a_a} \\ i_{a_b} \\ i_{a_c} \end{bmatrix} = \frac{P}{\sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Portanto, as correntes de compensação são da forma:

$$\begin{bmatrix} i_{c_a} \\ i_{c_b} \\ i_{c_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{a_a} - i_a \\ i_{a_b} - i_b \\ i_{a_c} - i_c \end{bmatrix}. \quad (13)$$

A definição de corrente ativa foi proposta por Fryze (1934), adotada por Czarnecki e, posteriormente, fundamentou o método Fryze-Bucholz-Depenbrock – ou FBD – (Depenbrock, 1993).

C) Rastreo senoidal (SIN)

Esta técnica tem como objetivo aproximar a corrente da fonte do formato senoidal e em fase com a tensão. Ela consiste no rastreo das componentes fundamentais das tensões das fontes e posterior compensação das correntes. Os valores de pico das correntes de cada fase são verificados e, em seguida, multiplicados pela senóide unitária fundamental rastreada da tensão ($v_{SENa,b,c}$). As correntes de compensação são da forma

$$\begin{bmatrix} i_{c_a} \\ i_{c_b} \\ i_{c_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{SENa} - i_a \\ i_{SENb} - i_b \\ i_{SEnc} - i_c \end{bmatrix}. \quad (14)$$

3 Material e Métodos

Para realizar o estudo comparativo das teorias de potência diante da aplicação das técnicas de compensação, utilizou-se a metodologia apresentada na Figura 2.

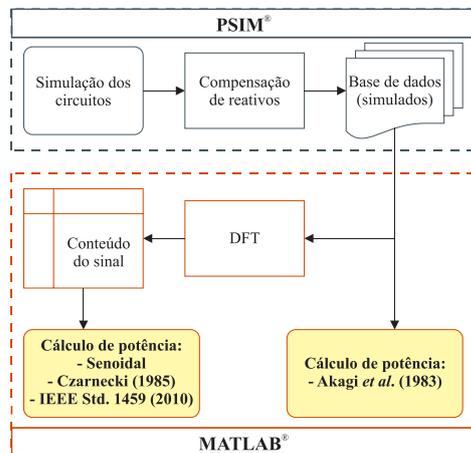


Figura 2. Metodologia empregada.

Foram utilizados dois circuitos, os quais foram simulados no *software* PSIM®, que possui utilização massiva em estudos de eletrônica de potência, devido

à simplicidade dos modelos de dispositivos e à flexibilidade e velocidade nas simulações. A partir do PSIM® foi possível aplicar as estratégias de compensação de reativos para cada um dos circuitos simulados de modo prático e eficaz.

Com a base de dados construída nas simulações (tensão e corrente), calculou-se parcelas de potência inerentes a cada teoria apresentada na Seção 2.1. A fim de evidenciar as possíveis melhorias no que diz respeito à potência reativa providas após a compensação, calculou-se a potência fornecida para o circuito antes e após o respectivo procedimento de compensação.

Para efetuar o comparativo entre os resultados de potência obtidos para cada uma das teorias, calculou-se os valores médios das parcelas de potência instantânea real e imaginária para a Teoria de Akagi *et al.* (Akagi *et al.*, 1999). Para as demais teorias, os cálculos foram precedidos pela aplicação da Transformada Discreta de Fourier (DFT) e extração do conteúdo do sinal (valores eficazes, fase, distorção harmônica etc.), de acordo com o conjunto de equações definidas para cada teoria na literatura (Czarnecki, 1988; IEEE Std. 1459, 2010). Todos os cálculos de potência foram efetuados mediante a exportação dos dados do PSIM® para o *software* MATLAB®.

Os circuitos simulados consistem em fontes de tensão em série com um ramo $R_L L_L$ ($R_L = 1 \text{ m}\Omega$, $L_L = 10 \text{ }\mu\text{H}$) e a carga, conforme apresentado na Figura 3. As cargas escolhidas são do tipo indutivo, devido a sua abundância nos SEP. Para a geração de correntes com formas de onda distorcidas, aplicou-se uma carga não-linear representada por uma ponte de diodos na Figura 3. As medições de tensão e corrente foram efetuadas no ponto de acoplamento comum (PAC).

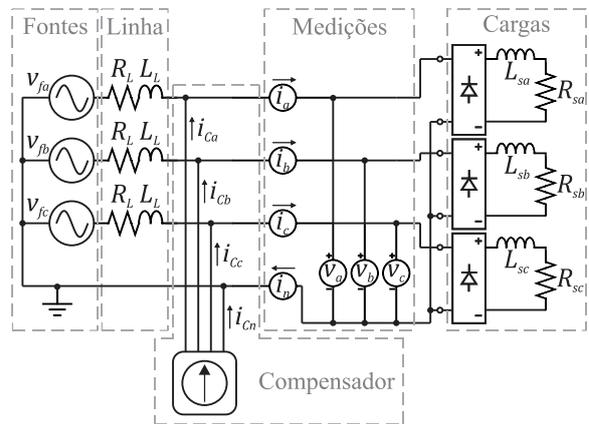


Figura 3. Circuitos T1 e T2.

Os circuitos são diferenciados pela carga, conforme apresentado na Tabela 2, e também pela tensão. Enquanto o circuito T1 possui tensão trifásica balanceada com valor de pico de 100 V, as tensões do circuito T2 são desbalanceadas e com conteúdo harmônico, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 2. Parâmetros das cargas.

Circuito T1	Circuito T2
$R_{sa} = 25 \Omega, L_{sa} = 18 \text{ mH}$	$R_{sa} = 25 \Omega, L_{sa} = 18 \text{ mH}$
$R_{sb} = 25 \Omega, L_{sb} = 18 \text{ mH}$	$R_{sb} = 17 \Omega, L_{sb} = 12 \text{ mH}$
$R_{sc} = 25 \Omega, L_{sc} = 18 \text{ mH}$	$R_{sc} = 9 \Omega, L_{sc} = 6 \text{ mH}$

Tabela 3. Parâmetros das fontes de tensão do Circuito T2.

Ordem harmônica ($f_h = h \cdot 60 \text{ Hz}$)	Circuito T2		
	$\widehat{v}_{fa} \text{ (V)}$	$\widehat{v}_{fb} \text{ (V)}$	$\widehat{v}_{fc} \text{ (V)}$
$h = 1$	$100 \angle 0^\circ$	$109 \angle -120^\circ$	$91 \angle 120^\circ$
$h = 3$	$20 \angle 0^\circ$	$21,8 \angle -120^\circ$	$18,2 \angle 120^\circ$
$h = 5$	$7 \angle 0^\circ$	$7,63 \angle -120^\circ$	$6,37 \angle 120^\circ$
$h = 7$	$2 \angle 0^\circ$	$2,11 \angle -120^\circ$	$1,89 \angle 120^\circ$
$h = 9$	$1 \angle 0^\circ$	$1,09 \angle -120^\circ$	$0,91 \angle 120^\circ$

Ao final, analisou-se a taxa de distorção harmônica de cada sinal de corrente, antes e após a compensação, mediante:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}. \quad (15)$$

4 Apresentação e Análise dos Resultados

4.1 Circuito T1

Os sinais de tensão e corrente, antes da compensação, do circuito T1 são apresentados na Figura 4 e as parcelas de potência na Tabela 4.

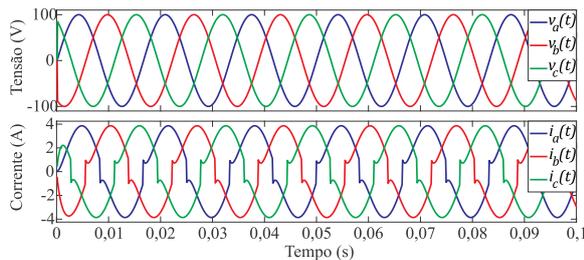


Figura 4. Circuito T1: tensões e correntes no PAC.

Tabela 4. Circuito T1: parcelas de potência.

Definição	$P \text{ (W)}$	Q	$RES \text{ (VA)}$
Senoidal	575,5	81,4 var	-
Akagi <i>et al.</i>	572,05	81,74 vai	-
Czarnecki	575,05	82,37 var	95,35
IEEE Std. 1459	575,46	81,46 var	72,99

O circuito possui tensões puramente senoidais, logo, a proximidade entre os resultados das parcelas de potência, tanto ativa quanto reativa, era esperada. Os resultados após a aplicação das técnicas de compensação tratadas na Seção 2.2 são apresentados a seguir.

A) Técnica pq

As correntes na fonte de tensão, antes e após a compensação pq são ilustradas na Figura 5 e as potências

fornecidas pela fonte, de acordo com cada teoria, são apresentadas na Tabela 5.

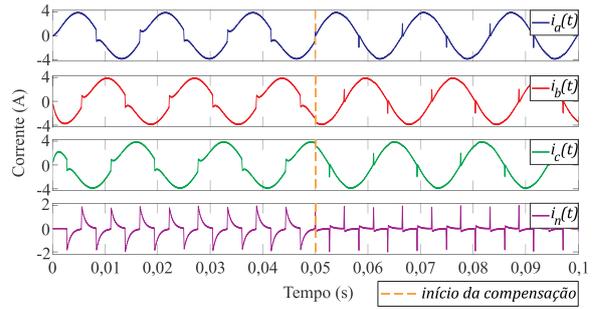


Figura 5. Circuito T1: correntes na fonte antes e depois da compensação pq.

Tabela 5. Circuito T1: potência fornecida após a compensação pq.

Definição	$P \text{ (W)}$	Q	$RES \text{ (VA)}$
Senoidal	575,42	-21,58 var	-
Akagi <i>et al.</i>	572,28	-21,60 vai	-
Czarnecki	572,02	22,10 var	77,58
IEEE Std. 1459	575,43	-21,58 var	46,14

A técnica de compensação aproximou a característica das correntes de senoides puras e também diminuiu a quantidade de reativos fornecidos pela fonte, em detrimento do circuito original.

A partir da Tabela 5, constatou-se a peculiaridade dos resultados de potência não-ativa para cada teoria, principalmente para a teoria de Czarnecki, que foi a única a apresentar valor positivo para a potência reativa, visto que nessa teoria não há especificação de sinal para esta parcela de potência.

B) Técnica CPC

As formas de onda das correntes na fonte de tensão antes e após a compensação CPC são ilustradas na Figura 6 e as parcelas de potência são apresentadas na Tabela 6.

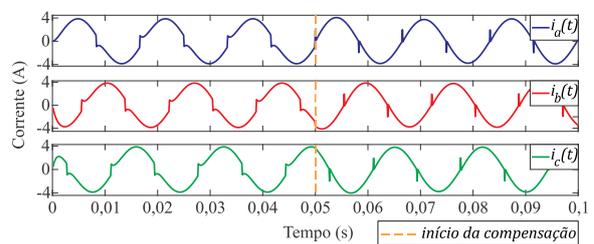


Figura 6. Circuito T1: correntes na fonte antes e depois da compensação CPC.

Tabela 6. Circuito T1: potência fornecida após a compensação CPC.

Definição	$P \text{ (W)}$	Q	$RES \text{ (VA)}$
Senoidal	589,89	-21,66 var	-
Akagi <i>et al.</i>	586,34	-21,75 vai	-
Czarnecki	586,33	24,32 var	81,01
IEEE Std. 1459	589,90	-21,70 var	49,85

Assim como o obtido em pq, a compensação CPC aproximou as correntes do formato de onda das tensões, isto é, senoidal. No entanto, neste caso, além de diminuir a quantidade de reativos no sistema, a

compensação acarretou em uma demanda maior de potência ativa do sistema. Esta diferença na demanda de potência ativa pode ser atribuída à parcela absorvida pelo próprio compensador empregado.

C) Técnica SIN

As formas de onda das correntes, antes e após a compensação SIN, são ilustradas na Figura 7, e, na Tabela 7, são apresentadas as parcelas de potência.

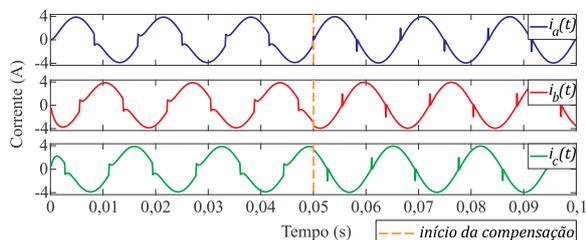


Figura 7. Circuito T1: correntes na fonte antes e depois da compensação SIN.

Tabela 7. Circuito T1: potência fornecida após a compensação SIN.

Definição	P (W)	Q	RES (VA)
Senoidal	588,40	-21,73 var	-
Akagi <i>et al.</i>	584,90	-21,74 vai	-
Czarnecki	584,90	22,36 var	78,75
IEEE Std. 1459	588,42	-21,73 var	45,80

Neste caso, os efeitos da compensação SIN foram similares aos observados em CPC: melhoria na forma de onda das correntes, diminuição da quantidade de reativos, e aumento na demanda de potência ativa.

Os resultados das taxas de distorção harmônica das correntes, para as três estratégias de compensação aplicadas, são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Circuito T1: taxas de distorção harmônica das correntes das fontes.

Condição de circuito	THD (%)		
	I_a	I_b	I_c
Original	10,06	10,31	10,56
Após pq	2,40	2,31	2,26
Após CPC	4,56	4,39	3,85
Após SIN	2,21	2,12	2,03

Os resultados de THD apresentados evidenciam a SIN como a melhor técnica de compensação de harmônicos nas correntes. No entanto, todas as técnicas reduziram consideravelmente a distorção nas correntes.

De modo geral, a Técnica pq apresentou o melhor desempenho, visto que, além de minimizar a distorção harmônica nas correntes das fontes, diminuiu a quantidade de reativos inseridos pelas fontes sem demandar uma quantidade maior de potência ativa. Estes resultados foram evidenciados pelo cálculo de potência segundo as teorias abordadas neste trabalho.

4.2 Circuito T2

Os sinais de tensão e corrente antes da compensação são ilustrados na Figura 8 e parcelas de potência são apresentadas na Tabela 9.

Os resultados evidenciaram as distinções entre as parcelas de potência de cada teoria. Isto se deve ao fato das tensões possuírem conteúdo harmônico e desbalanço entre si, além das cargas serem desequilibradas.

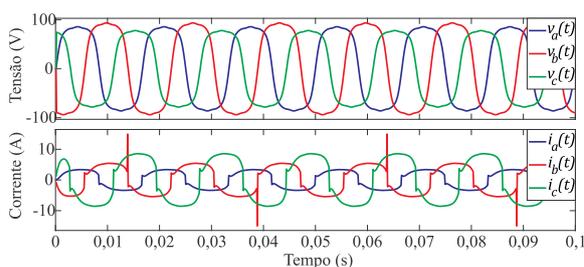


Figura 8. Circuito T2: tensões e correntes no PAC.

Tabela 9. Circuito T2: parcelas de potência.

Definição	P (kW)	Q	RES (VA)
Senoidal	0,98	87,72 var	-
Akagi <i>et al.</i>	1,02	100,92 vai	-
Czarnecki	1,02	107,24 var	172,34
IEEE Std. 1459	1,03	83,80 var	116,95

Os resultados da definição de potência do caso senoidal diferem das demais em termos de potência ativa e reativa. Ademais, as parcelas reativas e residuais calculadas segundo as teorias apresentadas na Seção 2.1 possuem resultados dissonantes entre si.

Em seguida, são apresentados os resultados após a aplicação das técnicas de compensação tratadas na Seção 2.2.

A) Técnica pq

As correntes na fonte de tensão, antes e após a compensação pq são evidenciadas na Figura 9 e as potências fornecidas pela fonte, de acordo com cada teoria, são apresentadas na Tabela 10.

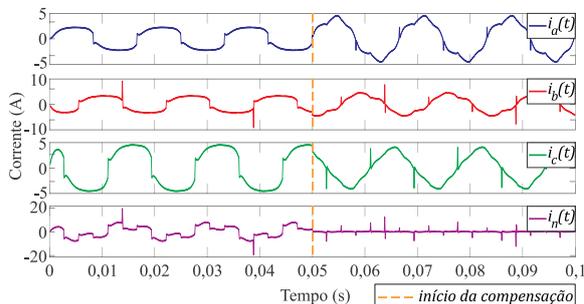


Figura 9. Circuito T2: correntes na fonte antes e depois da compensação pq.

Tabela 10. Circuito T2: potência fornecida após a compensação pq.

Definição	P (kW)	Q	RES (VA)
Senoidal	1,02	-35,00 var	-
Akagi <i>et al.</i>	1,02	-30,50 vai	-
Czarnecki	1,02	43,92 var	320,27
IEEE Std. 1459	1,03	-37,10 var	287,44

A compensação pq aproximou as correntes da fonte do formato senoidal e minimizou a potência reativa demandada da fonte. Além disso, as correntes de

fase tendem ao equilíbrio após a compensação. No entanto, a parcela residual de potência aumentou consideravelmente, conforme observado nos resultados das teorias de Czarnecki e da norma IEEE 1459.

B) Técnica CPC

As formas de onda das correntes na fonte de tensão antes e após a compensação CPC são ilustradas na Figura 10, e as parcelas de potência são apresentadas na Tabela 11.

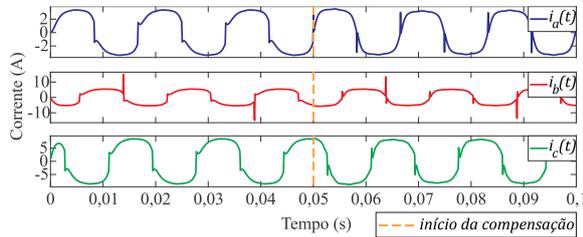


Figura 10. Circuito T2: correntes na fonte antes e depois da compensação CPC.

Tabela 11. Circuito T2: potência fornecida após a compensação CPC.

Definição	P (kW)	Q	RES (VA)
Senoidal	1,00	-12,16 var	-
Akagi <i>et al.</i>	1,04	-3,06 vai	-
Czarnecki	1,05	23,08 var	205,48
IEEE Std. 1459	1,05	-13,26 var	204,62

A compensação CPC aproximou os sinais de corrente dos sinais de tensão correspondentes. Ademais, constatou-se uma diminuição acentuada na potência reativa fornecida pela fonte. Entretanto, esta diminuição acarretou em um aumento de potência ativa demandada da fonte, o que evidencia um consumo de ativos por parte do compensador. Quando comparadas aos resultados obtidos na compensação pq, as parcelas residuais de potência não ativa são menores, o que indica uma quantidade menor de potência não-ativa demandada da fonte.

C) Técnica SIN

As formas de onda das correntes, antes e após a compensação SIN, são ilustradas na Figura 11, e, na Tabela 12, são apresentadas as parcelas de potência.

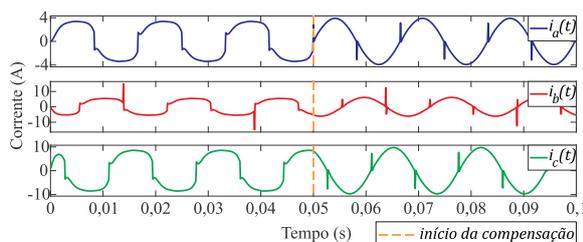


Figura 11. Circuito T2: correntes na fonte antes e depois da compensação SIN.

Foi observado que as correntes da fonte se aproximaram do formato senoidal após a compensação SIN, assim como a redução da potência não-ativa demandada do circuito. Entretanto, as fontes fornecem menos potência ativa, isto é, o compensador, além de minimizar os reativos, também deve fornecer potência

ativa para a carga. Este comportamento ressalta um ponto negativo desta técnica.

Tabela 12. Circuito T2: potência fornecida após a compensação SIN.

Definição	P (kW)	Q	RES (VA)
Senoidal	0,97	-26,86 var	-
Akagi <i>et al.</i>	0,97	-19,08 vai	-
Czarnecki	0,97	32,36 var	279,56
IEEE Std. 1459	0,97	-29,77 var	279,84

Os resultados do circuito T2 evidenciaram a necessidade de uma análise mais apurada da parcela não-ativa de potência. Apesar da redução da quantidade de reativos no sistema, as componentes residuais da potência não-ativa, conforme Czarnecki e IEEE 1459, aumentaram em todas as técnicas de compensação simuladas neste trabalho. Isto é, o bom resultado indicado pela teoria de Akagi *et al.* apenas diz respeito à parcela efetivamente reativa de energia. Destarte, os resultados das parcelas definidas por Akagi *et al.* podem inferir uma análise incorreta da potência não-ativa demandada da fonte.

Por fim, são apresentados na Tabela 13 os resultados das taxas de distorção harmônica das correntes, para as três técnicas de compensação.

Tabela 13. Circuito T2: taxas de distorção harmônica das correntes das fontes.

Condição de circuito	THD (%)		
	I_a	I_b	I_c
Original	22,98	23,02	22,71
Após pq	14,39	14,43	10,68
Após CPC	21,47	21,97	22,73
Após SIN	3,83	6,20	3,68

Como se vê, as taxas de distorção harmônica da corrente após a aplicação da técnica baseada na teoria CPC diminuíram menos do que nas outras técnicas. Isso se deve à característica da corrente se tornar similar à da tensão. Assim como o ocorrido em T1, a compensação SIN minimizou significativamente a distorção na corrente, o que era esperado, visto que a referência de compensação foi puramente senoidal. As formas de onda das tensões vinculadas a seu desbalanço e desequilíbrio das cargas afetaram os resultados da THD após a compensação pq quando comparado com T1.

4 Conclusão

Este trabalho apresentou um estudo comparativo de três teorias de potência para sistemas trifásicos não senoidais. Em circuitos pré-definidos, analisou-se as parcelas de potência ativa e não-ativa de cada uma das teorias. Os resultados obtidos atestaram a não validade das equações de potência do caso senoidal em sistemas cujos sinais são distorcidos. Embora haja consenso entre os resultados para potência ativa, o mesmo não foi verificado para a potência não-ativa. Foi constatado que a presença de distorções nas tensões, bem como o desbalanço entre elas e o desequilíbrio entre

as cargas acarreta o aumento da parcela residual de potência.

A compensação de reativos nos casos estudados neste trabalho evidenciou uma relação de compromisso entre potência demandada e minimização da distorção dos sinais. A técnica que melhor adequou a forma de onda dos sinais (SIN) também provocou a diminuição de potência ativa fornecida ao circuito, o que indica a necessidade de fornecimento de ativos por parte do compensador. Verificou-se que a Técnica CPC foi a que ocasionou a maior redução da quantidade de reativos demandados da fonte, mas também a que provocou a maior demanda de potência ativa.

A técnica que apresentou melhores resultados foi a pq, visto que minimizou a distorção das correntes e a quantidade de reativos demandados da fonte sem demandar mais potência ativa. Além disso, após a aplicação da compensação, as correntes de fase tenderam ao equilíbrio no circuito T2, fato não observado nas demais estratégias.

Embora o comportamento não-linear das cargas dificulte uma minimização mais acentuada da potência não-ativa, os resultados obtidos neste estudo evidenciaram que as parcelas reativas são compensáveis. Para compensar a parcela residual de potência não-ativa, outras estratégias devem ser adotadas.

É necessário ressaltar que as especificidades em relação à aplicação prática de cada compensador foram desprezadas. Isto é, a aplicação de cada técnica foi explorada de maneira teórica a partir da injeção das correntes indicadas por cada uma delas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPgEE/COPELE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Referências Bibliográficas

- Akagi, H.; Kanazawa, Y.; Fujita, K. and Nabae, A. (1983), "Generalized Theory of Instantaneous Reactive Power and Its Application", *Transactions of the IEE-Japan*, Part B, Vol. 103 No. 7, pp. 483-490.
- Akagi, H.; Ogasawara, S. and Kim, H. (1999), "The Theory of Instantaneous Power in three-phase four-wire systems: A Comprehensive Approach". *IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, pp. 431-439.
- Akagi, H.; Watanabe, E. H. and Aredes, M. (2007), *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. John Wiley & Sons, USA.
- Aredes, M. and Watanabe, E. H. (1995), "New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Power Filters", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10 No. 3, pp. 1649-1656.
- Arrilaga, J. and Watson, N. R. (2003), *Power System Harmonics*, 2nd edition. John Wiley & Sons Ltd.
- Budeanu, C. I (1927), *Reactive and fictitious power*. Instituto Romeno de Energia.
- Czarnecki, L. S. (1985), "Considerations on the Reactive Power in Nonsinusoidal Situations", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. IM-34 No. 3, pp. 399-404.
- Czarnecki, L. S. (1988), "Orthogonal decomposition of the currents in a 3-phase nonlinear asymmetrical circuit with a nonsinusoidal voltage source", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 37 No. 1, pp. 30-34.
- Czarnecki, L. S. (2016), "From Steinmetz to Currents' Physical Components (CPC): History of Power Theory Development". *2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, Craiova, Romênia.
- Depenbrock, M. (1993), "The FBD-Method, a Generally Applicable Tool for Analyzing Power Relations" *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8 No. 2, pp. 381-387.
- Elgerd, O. I. (1976), *Introdução à Teoria de Sistema de Energia Elétrica*, McGraw-Hill do Brasil.
- Filipski, P. S. (1993) "Apparent Power – a Misleading Quantity in the Non-Sinusoidal Power Theory: Are all Non-Sinusoidal Power Theories Doomed to Fail?" *Europ. Trans. on Electric Power, ETEP*. Vol. 3 No. 1: pp.21-26.
- Fryze, S. (1931), *Active, reactive and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current*. Przegł. Elektrotech,
- IEEE Standard 1459 (2000), *Trial-use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*. IEEE, pp. 1-50.
- IEEE Standard 1459 (2010). *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*. IEEE, pp. 1-52.
- Maciazek, M. (2011), "Power Theories Applications to Control Active Compensators", in Benysek, G.; Pasko, M. (Ed.), *Power Theories for Improved Power Quality*. Springer, pp. 49-116.
- Marafão, F. P. (2004), *Análise e Controle da Energia Elétrica Através de Técnicas de Processamento Digital de Sinais*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas-SP. Dezembro 2004.
- Silva, H. J. R.; Martins, J. S. and Afonso, J. L. (2001), "Avaliação de Diferentes Técnicas de Análise de Sistemas Eléctricos com Formas de Onda Não-Sinusoidais", *IV Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica – IV SBQEE*. Porto Alegre-RS.