

Um estudo sobre os efeitos da distorção harmônica da tensão no cálculo de potência

Rodrigo de A. Coelho* Núbia S. D. Brito** Érica M. Lima*

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica –
PPgEE/COPELE, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
** Departamento de Engenharia Elétrica – DEE, Universidade Federal
de Campina Grande – UFCG
(e-mail: rodrigo.almeida@ee.ufcg.edu.br)

Abstract: The spread of harmonics in the electric power system has been leveraging power quality area, where research related to the interpretation of electric power under nonsinusoidal conditions stand out since for distorted signals traditional power calculation is unsuitable. This fact has motivated the development of several power theories that consider the existence of distorted signals in a circuit. In this context, this work presents a study that aims to analyze the effects of harmonic distortion on the power calculation, according to two theories, CPC power theory, and IEEE 1459 Standard. Using a nonlinear circuit, the power defined in each theory is analyzed. Results evince that power analysis should be performed together with the circuit operating characteristics, to prevent misinterpretation.

Resumo: A disseminação de harmônicos no sistema elétrico de potência tem alavancado a área de qualidade da energia elétrica, na qual se destacam as pesquisas relacionadas à interpretação da potência elétrica em condições não-senoidais, visto que, para sinais distorcidos, o cálculo de potência tradicional é inadequado. Este fato tem motivado o desenvolvimento de diversas teorias de potência que contemplam a existência de sinais distorcidos em um circuito. Nesse contexto, este trabalho apresenta um estudo que teve como objetivo analisar os efeitos da distorção harmônica da tensão no cálculo de potência segundo duas teorias, a Teoria CPC e a Norma IEEE 1459. A partir de um circuito não-linear, analisou-se as potências definidas em cada teoria. Os resultados evidenciaram que a análise das potências deve ser efetuada em conjunto com a característica de operação do circuito, de modo a evitar interpretações equivocadas.

Keywords: power quality; harmonic distortion; nonsinusoidal signals; power calculation; power theories.

Palavras-chaves: qualidade da energia elétrica; distorção harmônica; sinais não-senoidais; cálculo de potência; teorias de potência.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a distorção dos sinais de tensão e corrente não é um fato novo, de fato ela existe desde os primórdios da transmissão de energia elétrica em corrente alternada (Arrillaga and Watson, 2003). Entretanto, a atenção do setor elétrico em relação a esse problema aumentou com a difusão de cargas não-lineares conectadas ao sistema elétrico de potência (SEP) (Dugan et al., 2004), visto que elas acarretam a existência de correntes distorcidas, o que pode provocar discrepâncias entre as formas de onda da tensão e da corrente. Concomitantemente, o efeito do acoplamento entre a fonte e a carga pode acarretar a propagação dos harmônicos da corrente para a tensão, a depender da impedância no ponto de acoplamento comum (PAC) (Fuchs and Masoum, 2015).

Como resultado, a discrepância entre a forma de onda dos sinais que compõem o SEP e a forma senoidal pura exigiu a reavaliação das definições de potência elétrica. Historicamente, os estudos sobre esse tema datam da década de 1920, quando a comunidade científica começou

a questionar a interpretação das definições de potência propostas por Steinmetz (1897). Os primeiros trabalhos contendo novas definições de potência foram publicados por Budeanu (1927) e Fryze (1932) e desde então vêm sendo propostas diversas teorias de potência (Czarnecki, 1983; Akagi et al., 1983; Shepherd and Zakikhani, 1972; Sharon, 1973; Depenbrock, 1992; IEEE Std. 1459, 2000; Tenti and Mattavelli, 2003), muitas das quais continuam em aperfeiçoamento até a presente data. No entanto, até hoje não existe uma teoria de potência totalmente aceita e difundida.

Embora haja unanimidade com relação à potência ativa, a qual corresponde a energia efetivamente consumida em um circuito, o conceito de potência reativa ainda é controverso. Segundo Emanuel (1990), em condições não-senoidais, a potência reativa não pode ser diretamente associada ao comportamento de elementos armazenadores de energia.

Este trabalho se insere nesse contexto e apresenta um estudo sobre os efeitos associados ao cálculo de potência em circuitos com tensão distorcida. Para tanto, analisou-

se um circuito não-linear com diferentes distorções de tensão, as quais foram obtidas a partir da variação tanto da distorção harmônica da tensão fornecida quanto da impedância de linha do circuito. As definições de potência adotadas para o estudo foram a Teoria CPC (Czarnecki, 1983, 1985) e a Norma IEEE 1459 (IEEE Std. 1459, 2000, 2010), devido a estas serem reconhecidamente as principais teorias de potência fundamentadas no domínio da frequência.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Teoria CPC

Em Czarnecki (1983, 1985), foram apresentadas novas definições de potência, as quais, segundo o autor, superam as limitações do modelo proposto por Fryze (1932). Definida no domínio da frequência, a Teoria CPC – do inglês, *Currents' Physical Components* – é fundamentada na decomposição da corrente em componentes ortogonais. Segundo essa teoria, a tensão, $v(t)$, e a corrente, $i(t)$, são definidas conforme:

$$v(t) = V_0 + \sqrt{2}\Re \sum_{h \in N} \hat{V}_h e^{j\omega_h t}, \quad (1)$$

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2}\Re \sum_{h \in N} \hat{I}_h e^{j\omega_h t}, \quad (2)$$

em que: V_0 e I_0 representam os valores médios de $v(t)$ e $i(t)$; $\Re$ representa o operador real, aplicado a números complexos; $\hat{V}_h$ e $\hat{I}_h$ denotam os fasores da tensão e da corrente para a componente de frequência de ordem h (N corresponde ao conjunto das componentes h), respectivamente; e ω_h indica a frequência para a ordem harmônica h ($\omega_h = 2\pi f h$).

Conforme Czarnecki (2019), em circuitos com cargas não-lineares, as quais geram harmônicos (HGL – do inglês, *harmonic generating loads*), a potência ativa de alguns componentes de frequência pode ser negativa ($P_h = V_h I_h \cos(\phi_h)$, em que ϕ_h representa a diferença de fase entre tensão e corrente para a componente h), o que indica haver transferência de energia da carga para a fonte. Desse modo, o conjunto das componentes de frequência, N , pode ser dividido em dois subconjuntos, N_C e N_G :

$$h \in \begin{cases} N_C, & P_h \geq 0 \ (|\phi_h| \leq \pi/2); \\ N_G, & P_h < 0 \ (|\phi_h| > \pi/2). \end{cases} \quad (3)$$

Portanto, tensão e corrente podem ser decompostos a partir de N_C e N_G (Czarnecki, 2019):

$$v(t) = \sum_{h \in N_C} v_h(t) + \sum_{h \in N_G} v_h(t) = v_C(t) - v_G(t), \quad (4)$$

$$i(t) = \sum_{h \in N_C} i_h(t) + \sum_{h \in N_G} i_h(t) = i_C(t) + i_G(t). \quad (5)$$

Caso a carga seja linear ($N = N_C$), o conjunto N_G é nulo ($N_G = \emptyset$), isto é, $v(t) = v_C(t)$ e $i(t) = i_C(t)$. A componente $i_C(t)$ denota a corrente consumida pela carga, enquanto $i_G(t)$ representa a corrente gerada pela carga. Neste caso, se $V_0 \neq 0$, a componente DC da corrente é devida à $i_C(t)$. Caso contrário ($V_0 = 0$), a componente I_0 , se existir, é devida à $i_G(t)$. Admitindo que $V_0 = 0$, tem-se:

$$i_C(t) = \sqrt{2}\Re \sum_{h \in N_C} (G_{Ch} + jB_{Ch}) \hat{V}_h e^{j\omega_h t}, \quad (6)$$

$$i_G(t) = I_0 + \sqrt{2}\Re \sum_{h \in N_G} \hat{I}_h e^{j\omega_h t}, \quad (7)$$

em que G_{Ch} e B_{Ch} denotam a condutância e a admitância da carga para a ordem harmônica h , respectivamente.

A condutância equivalente da carga, G_{Ce} , é definida a partir da potência ativa consumida, P_C , (Czarnecki, 2008):

$$G_{Ce} = \frac{P_C}{V_C^2} = \frac{\sum_{h \in N_C} P_h}{\sum_{h \in N_C} V_h^2}, \quad (8)$$

em que V_C denota o valor eficaz da tensão $v_C(t)$.

A corrente consumida pode ser decomposta em componentes ativa, $i_{Ca}(t)$, reativa, $i_{Cr}(t)$, e dispersa, $i_{Cs}(t)$:

$$i_C(t) = i_{Ca}(t) + i_{Cr}(t) + i_{Cs}(t), \quad (9)$$

as quais são definidas conforme a seguir:

$$i_{Ca}(t) = G_{Ce} v_C(t) = \sqrt{2}\Re \sum_{h \in N_C} G_{Ce} \hat{V}_h e^{j\omega_h t}, \quad (10)$$

$$i_{Cr}(t) = \sqrt{2}\Re \sum_{h \in N_C} jB_{Ch} \hat{V}_h e^{j\omega_h t}, \quad (11)$$

$$i_{Cs}(t) = \sqrt{2}\Re \sum_{h \in N_G} (G_{Ch} - G_{Ce}) \hat{V}_h e^{j\omega_h t}. \quad (12)$$

A corrente ativa possui uma característica que replica a forma de onda da tensão $v_C(t)$, a corrente reativa diz respeito à potência reativa do circuito e a corrente dispersa se refere à variação da condutância em função da frequência. Finalmente, a decomposição total da corrente resulta nas seguintes componentes ortogonais:

$$I^2 = I_C^2 + I_G^2 = I_{Ca}^2 + I_{Cr}^2 + I_{Cs}^2 + I_G^2, \quad (13)$$

em que I_C e I_G denotam os valores eficazes de $i_C(t)$ e $i_G(t)$, enquanto I_{Ca} , I_{Cr} e I_{Cs} representam os valores eficazes das componentes ativa, reativa e dispersa, respectivamente.

Desse modo, as potências são definidas conforme:

$$\begin{aligned} S^{\text{CPC}^2} &= V^2 I^2 \\ &= V^2 (I_{Ca}^2 + I_{Cr}^2 + I_{Cs}^2 + I_G^2) \\ &= P^{\text{CPC}^2} + Q_r^{\text{CPC}^2} + D_s^{\text{CPC}^2} + D_g^{\text{CPC}^2}, \end{aligned} \quad (14)$$

em que S^{CPC} (VA), P^{CPC} (W), Q_r^{CPC} (VA), D_s^{CPC} (VA) e D_g^{CPC} (VA) denotam a potência aparente, a potência ativa, a potência reativa, a potência dispersa e a potência harmônica gerada, respectivamente.

2.2 Norma IEEE 1459

A Norma IEEE Std. 1459 (2000) definiu um novo modelo de cálculo de potência em condições não-senoidais, o qual foi atualizado em IEEE Std. 1459 (2010). Na Norma IEEE 1459, o cálculo é fundamentado na decomposição dos sinais de tensão e corrente em termos da componente fundamental e dos harmônicos:

$$\begin{aligned} v(t) &= v_1(t) + v_H(t) = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega_1 t - \phi_{v_1}) \\ &\quad + \left(V_0 + \sqrt{2} \sum_{h>1} V_h \sin(\omega_h t - \phi_{v_h}) \right), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} i(t) &= i_1(t) + i_H(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega_1 t - \phi_{i_1}) \\ &\quad + \left(I_0 + \sqrt{2} \sum_{h>1} I_h \sin(\omega_h t - \phi_{i_h}) \right), \end{aligned} \quad (16)$$

cujos valores eficazes correspondentes são:

$$V^2 = V_1^2 + V_H^2 = V_1^2 + \sum_{h \neq 1} V_h^2, \quad (17)$$

$$I^2 = I_1^2 + I_H^2 = I_1^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2, \quad (18)$$

em que V_H e I_H correspondem aos valores eficazes das componentes $v_H(t)$ e $i_H(t)$, respectivamente, enquanto V_h e I_h denotam os valores eficazes correspondentes à tensão e corrente na ordem harmônica h .

Baseado nestes termos, a potência ativa, P^{IEEE} (W), é calculada conforme:

$$P^{\text{IEEE}} = P_1^{\text{IEEE}} + P_H^{\text{IEEE}} = V_1 I_1 \cos(\phi_1) + \left(V_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos(\phi_h) \right), \quad (19)$$

em que: P_1^{IEEE} (W) e P_H^{IEEE} (W) são, respectivamente, a potência ativa fundamental e a potência ativa harmônica; e $\phi_h = \phi_{v_h} - \phi_{i_h}$.

A potência reativa, Q_1^{IEEE} (var), é computada a partir de:

$$Q_1^{\text{IEEE}} = V_1 I_1 \sin(\phi_1). \quad (20)$$

A potência aparente, S^{IEEE} (VA), pode ser representada como uma função dos termos de tensão e corrente:

$$S^{\text{IEEE}^2} = (VI)^2 = S_1^{\text{IEEE}^2} + S_N^{\text{IEEE}^2}, \quad (21)$$

na qual:

$$S_1^{\text{IEEE}^2} = (V_1 I_1)^2 = P_1^{\text{IEEE}^2} + Q_1^{\text{IEEE}^2}, \quad (22)$$

$$S_N^{\text{IEEE}^2} = (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 = D_I^{\text{IEEE}^2} + D_V^{\text{IEEE}^2} + S_H^{\text{IEEE}^2}, \quad (23)$$

em que: D_I^{IEEE} (var) indica a potência de distorção da corrente – devido aos harmônicos presentes na corrente; D_V^{IEEE} (var) denota a potência de distorção da tensão – devido aos harmônicos presentes na tensão; e S_H^{IEEE} (VA) representa a potência aparente harmônica – que engloba a distorção presente tanto na tensão quanto na corrente.

A norma ainda define a potência de distorção harmônica, D_H^{IEEE} (var), conforme:

$$D_H^{\text{IEEE}} = \sqrt{S_H^{\text{IEEE}^2} - P_H^{\text{IEEE}^2}}, \quad (24)$$

Finalmente, a potência aparente pode ser decomposta em:

$$S^{\text{IEEE}^2} = P_1^{\text{IEEE}^2} + Q_1^{\text{IEEE}^2} + D_I^{\text{IEEE}^2} + D_V^{\text{IEEE}^2} + P_H^{\text{IEEE}^2} + D_H^{\text{IEEE}^2}. \quad (25)$$

2.3 Propagação de harmônicos no SEP

Para analisar a propagação de harmônicos no SEP, considere a Figura 1, que ilustra a conexão entre fonte e cargas em um SEP, na qual a impedância de linha (Z_L) provoca uma queda na tensão fornecida às cargas (v_{PAC}) com relação à tensão da fonte (v). Quando há conexão de cargas não-lineares ao sistema, esse efeito é acrescido à propagação de harmônicos no SEP, pois a corrente não-linear (i_{PAC}) resulta na disseminação da não-linearidade para a tensão no PAC.

Como a impedância varia com a frequência, cada componente de frequência presente na corrente provocará uma

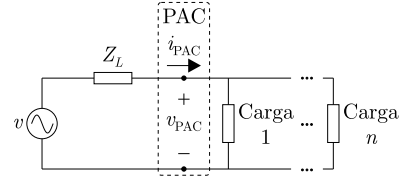


Figura 1. Impedância equivalente observada a partir do PAC.

queda de tensão distinta na impedância de linha. Portanto, em sua maioria, a distorção na tensão existe devido à corrente distorcida e à impedância de linha. Isto é, o efeito do acoplamento entre fonte e carga é responsável pelo surgimento de harmônicos na tensão, independentemente da condição senoidal da fonte.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para realizar o estudo proposto neste trabalho, aplicou-se a metodologia ilustrada resumidamente na Figura 2. Para tanto, circuitos com diferentes níveis de distorção harmônica da tensão fornecida, THD_V , e diversas condições de impedância de linha, Z_L , foram simulados. As diferentes condições de tensão e de impedância objetivam a comparação dos efeitos ocorridos sob o cálculo de potência segundo a Teoria CPC e a Norma IEEE 1459.

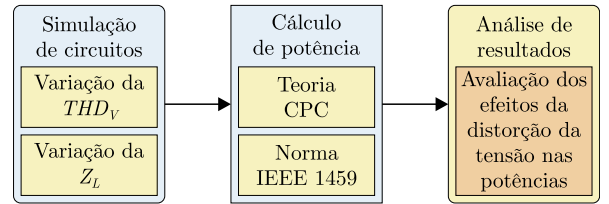


Figura 2. Metodologia aplicada ao estudo.

3.1 Simulação de circuitos

O circuito analisado é representado na Figura 3 e corresponde a um retificador monofásico não controlado com filtro indutivo no lado AC e carga capacitiva no lado DC (carga tipo fonte de tensão), cujos parâmetros são apresentados na Tabela 1. Duas condições de circuito foram adotadas de modo a contemplar a variação da THD_V (condição A) e de Z_L (condição B), conforme descrito a seguir.

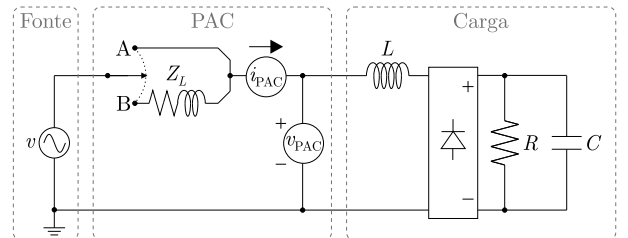


Figura 3. Circuito analisado.

Tabela 1. Parâmetros da carga.

L (μH)	R (Ω)	C (mF)
500,00	25,00	1,30

Condição A Nessa condição, o circuito possui Z_L nula e tensões com conteúdo harmônico, conforme apresentado na Tabela 2. Assim, a distorção harmônica da tensão fornecida à carga se deve apenas à fonte geradora.

Tabela 2. Parâmetros da tensão (condição A).

THD_V	$\hat{V}_h$ (V _{RMS})			
	$h = 1$	$h = 3$	$h = 5$	$h = 7$
0%	220,00∠0°	0	0	0
2%	220,00∠0°	1,42∠60°	3,82∠205°	1,64∠30°
4%	220,00∠0°	2,85∠60°	7,65∠205°	3,28∠30°
6%	220,00∠0°	4,27∠60°	11,48∠205°	4,96∠30°
8%	220,00∠0°	5,70∠60°	15,30∠205°	6,57∠30°
10%	220,00∠0°	7,12∠60°	19,13∠205°	8,22∠30°

em que h denota a ordem harmônica ($f_h = h \times 60$ Hz).

Os valores dos ângulos de fase e das amplitudes dos harmônicos das tensões apresentados na Tabela 2 foram baseados em medições efetuadas na Universidade Federal de Campina Grande, nas quais constatou-se a presença de harmônicos de terceira, quinta e sétima ordem no sinal de tensão. Desse modo, os valores eficazes das componentes harmônicas, considerando uma média das medições, foram obtidos a partir de:

$$V_3 = 0,3234 \cdot \xi, \quad V_5 = 0,8694 \cdot \xi, \quad V_7 = 0,3734 \cdot \xi, \quad (26)$$

em que $\xi = V_1 \cdot THD_V$.

Condição B Nesse caso, a tensão é senoidal e o circuito possui impedâncias de linha distintas, as quais são apresentadas na Tabela 3. Dessa maneira, o conteúdo harmônico da tensão fornecida à carga no PAC se origina da propagação dos harmônicos da corrente para a tensão a partir da impedância de linha.

Tabela 3. Impedância de linha (condição B).

$\hat{V}$ (V _{RMS})	$\hat{Z}_L$ (Ω)	R_L (Ω)	L_L (μH)
220,00∠0°	0	0	0
220,00∠0°	0,20∠0,001°	0,20	3,49
220,00∠0°	0,40∠0,001°	0,40	6,98
220,00∠0°	0,60∠0,001°	0,60	10,47
220,00∠0°	0,80∠0,001°	0,80	13,96
220,00∠0°	1,00∠0,001°	1,00	17,45

3.2 Cálculo de potência

A partir dos sinais de tensão e corrente obtidos no PAC, calculou-se as potências definidas na Teoria CPC e na Norma IEEE 1459. Para tanto, analisou-se o conteúdo de frequência dos sinais via Transformada Discreta de Fourier.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

4.1 Condição A

Na Figura 4 são ilustrados os sinais de tensão e corrente no PAC para os dois casos extremos analisados na condição A, $THD_V = 0$ e $THD_V = 10\%$.

Na Tabela 4 são apresentadas as potências calculadas para o circuito operando na condição A. Conforme esperado, para todos os perfis de tensão, os valores das potências

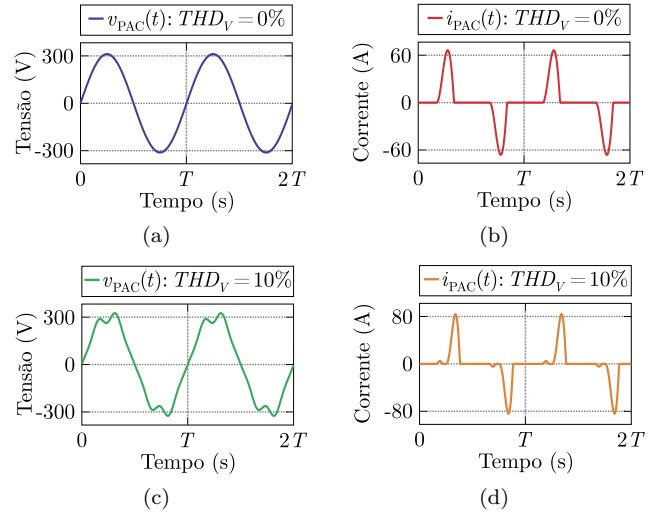


Figura 4. Condição A: (a) tensão no PAC ($THD_V = 0$); (b) corrente no PAC ($THD_V = 0$); (c) tensão no PAC ($THD_V = 10\%$); (d) corrente no PAC ($THD_V = 10\%$).

aparente e ativa definidas na Teoria CPC e na Norma IEEE 1459 convergiram entre si, bem como a potência reativa para a tensão em condição senoidal. Por outro lado, as divergências nos valores das potências reativas surgiram à medida que a THD_V variou.

Tabela 4. Condição A: potências calculadas conforme Teoria CPC e Norma IEEE 1459.

Potências	THD_V (%)					
	0	2	4	6	8	10
S^{CPC} (kVA)	5,46	5,15	4,89	4,82	5,27	6,03
P^{CPC} (kW)	3,65	3,57	3,52	3,48	3,48	3,55
Q_r^{CPC} (kVA)	0,48	3,60	3,26	2,91	2,78	2,98
D_s^{CPC} (kVA)	0	0,66	0,60	1,30	2,50	3,55
D_g^{CPC} (kVA)	4,03	0,58	0,72	0,99	1,28	1,49
S^{IEEE} (kVA)	5,46	5,15	4,89	4,82	5,27	6,03
P^{IEEE} (kW)	3,65	3,57	3,52	3,48	3,48	3,55
Q_1^{IEEE} (kvar)	0,48	0,56	0,70	0,94	1,32	1,70
D_I^{IEEE} (kvar)	4,03	3,66	3,33	3,27	3,88	4,78
D_V^{IEEE} (kvar)	0	0,07	0,14	0,21	0,28	0,36
D_H^{IEEE} (kvar)	0	0,07	0,13	0,18	0,24	0,33

Com relação à Teoria CPC, constatou-se um crescimento significativo da potência reativa (Q_r^{CPC}) com o aumento da THD_V . Isto ocorreu devido ao cálculo de Q_r^{CPC} considerar as contribuições de todas as componentes harmônicas presentes no conjunto N_C , o qual cresceu com o aumento da THD_V . A potência harmônica gerada (D_g^{CPC}) apresentou comportamento oposto ao observado em Q_r^{CPC} , visto que, ao inserir harmônicos na tensão, houve uma redução na quantidade de harmônicos incomuns entre corrente e tensão. Além disso, o aumento na potência dispersa também foi um indicador do crescimento na THD_V , pois essa potência representa a variação que ocorre na condutância do circuito em função das frequências dos sinais de tensão e corrente.

Embora o conteúdo da tensão na frequência fundamental, independentemente da THD_V , tenha permanecido inalterado, a não-linearidade da carga causou efeitos distintos na componente fundamental da corrente para cada tensão

aplicada ao circuito. Desse modo, não é possível estabelecer uma relação constante entre tensão e corrente fundamental para os diferentes níveis de distorção da tensão. Este fato é evidente quando se observa, na Tabela 4, o aumento da potência reativa definida na Norma IEEE 1459 com o crescimento da THD_V . Além disso, como as componentes harmônicas da tensão e corrente não são consideradas no cálculo de Q_1^{IEEE} , os seus efeitos reverberaram apenas nas potências de distorção (D_I^{IEEE} , D_V^{IEEE} e D_H^{IEEE}).

Destarte, enquanto a Teoria CPC define que a potência reativa se deve à defasagem entre tensão e corrente em cada componente de frequência, a Norma IEEE 1459 considera apenas a componente fundamental dos sinais, o que se assemelha à definição associada ao comportamento de elementos armazenadores de energia em um circuito. Além disso, embora as potências D_g^{CPC} e D_I^{IEEE} tenham convergido para $THD_V = 0$, seus valores foram dissonantes nas demais situações, visto que o cálculo de D_g^{CPC} considera apenas os harmônicos cuja potência ativa é negativa enquanto D_I^{IEEE} considera todos os componentes harmônicos presentes na corrente.

4.2 Condição B

Os sinais de tensão e corrente no PAC para $|\hat{Z}_L| = 0$ e $|\hat{Z}_L| = 1 \Omega$ são ilustrados na Figura 5.

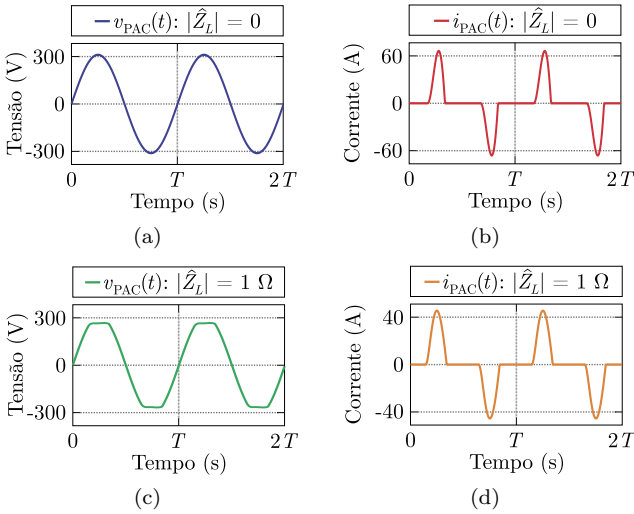


Figura 5. Condição B: (a) tensão no PAC ($|\hat{Z}_L| = 0$); (b) corrente no PAC ($|\hat{Z}_L| = 0$); (c) tensão no PAC ($|\hat{Z}_L| = 1 \Omega$); (d) corrente no PAC ($|\hat{Z}_L| = 1 \Omega$).

Conforme apresentado na Tabela 5, na condição B houve uma redução nas potências com o aumento na Z_L , o que se deve à queda de tensão que ocorre entre a fonte e o PAC. Além de provocar a propagação dos harmônicos da corrente para a tensão, a variação da impedância de linha afeta a comutação do retificador, isto é, há uma variação na característica da carga para cada Z_L considerada.

Neste caso, o aumento da potência dispersa (D_s^{CPC}) se referiu à carga não-linear, não à fonte de tensão. Desse modo, a origem de D_s^{CPC} não pode ser associada apenas à condição da tensão de fornecimento, visto que a impedância da linha pode ser determinante para essa potência.

Tabela 5. Condição B: potências calculadas conforme Teoria CPC e Norma IEEE 1459.

Potências	$ \hat{Z}_L (\Omega)$					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
S^{CPC} (kVA)	5,46	5,11	4,78	4,48	4,22	3,98
P^{CPC} (kW)	3,65	3,44	3,26	3,09	2,95	2,82
Q_r^{CPC} (kVA)	0,48	0,31	0,19	0,11	0,07	0,07
D_s^{CPC} (kVA)	0	3,58	3,48	3,23	3,01	2,80
D_g^{CPC} (kVA)	4,03	1,11	0,35	0,28	0,24	0,24
S^{IEEE} (kVA)	5,46	5,11	4,78	4,48	4,22	3,98
P^{IEEE} (kW)	3,65	3,45	3,26	3,09	2,95	2,82
Q_1^{IEEE} (kvar)	0,48	0,30	0,17	0,07	0,01	-0,02
D_I^{IEEE} (kvar)	4,03	3,70	3,40	3,11	2,85	2,63
D_V^{IEEE} (kvar)	0	0,05	0,10	0,13	0,16	0,18
D_H^{IEEE} (kvar)	0	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02

Por outro lado, à medida que a impedância aumentou, os harmônicos da corrente se propagaram para a tensão, o que justifica a redução da potência harmônica gerada (D_g^{CPC}) com o aumento de Z_L . Ademais, independentemente da distorção presente na tensão, a queda de tensão ocasionada por Z_L acarretou na redução da potência reativa (Q_r^{CPC}).

Com relação às potências definidas na Norma IEEE 1459, a potência reativa (Q_1^{IEEE}) também foi reduzida devido à queda de tensão fornecida à carga. Além disso, para $|\hat{Z}_L| = 1 \Omega$, Q_1^{IEEE} indicou uma mudança da carga vista do PAC com relação à componente fundamental, a qual passou a ter característica capacitiva. Com o aumento de Z_L , a distorção que se concentrava apenas na corrente se propagou para a tensão, conforme indicado pelo aumento de D_V^{IEEE} e redução de D_I^{IEEE} .

Nesta condição também foram constatadas divergências entre as potências reativas calculadas conforme a Teoria CPC e a Norma IEEE 1459. Neste caso, D_g^{CPC} poderia ocasionar uma análise equivocada do circuito, visto que o efeito de acoplamento entre fonte e carga (impedância de linha) provocou a sua redução, mesmo com a carga continuando responsável pela injeção de harmônicos no sistema. Por este viés, a redução menos significativa de D_I^{IEEE} não desassocia a responsabilidade da poluição do sistema do consumidor (carga).

Todavia, é preciso destacar que, na condição B, o fator principal para a ocorrência da distorção da tensão foi a impedância de linha, com a devida contribuição da corrente não-linear. Portanto, na hipótese de uma distorção de tensão elevada, a responsabilidade deve ser associada a quem tem o controle da impedância do sistema, isto é, a concessionária de energia elétrica.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas as definições de potência da Teoria CPC e da Norma IEEE 1459 para sistemas monofásicos. Em condições pré-estabelecidas de carga, realizou-se a simulação de circuitos com diferentes tensões e impedâncias de linha. A partir dos sinais obtidos das simulações, calculou-se as potências de acordo com a Teoria CPC e a Norma IEEE 1459.

Conforme esperado, houve convergência entre as potências aparente e ativa calculadas segundo as duas teorias,

diferentemente da potência reativa, cujos valores foram dissonantes. Em se tratando da potência reativa, a diferença essencial entre a Teoria CPC e a Norma IEEE 1459 é a consideração de todas as harmônicas (CPC) ou de apenas a componente fundamental (IEEE 1459) para o cálculo. Deste modo, à medida que a distorção dos sinais se acentua, maiores serão as discrepâncias entre as potências.

A partir da variação na distorção harmônica da tensão – admitindo-se impedância de linha nula –, verificou-se que a potência reativa calculada conforme a Teoria CPC variou de forma ora positiva, ora negativa devido ao comportamento não-linear da carga. Este efeito também foi verificado em Q_1^{IEEE} , visto que seu valor não se manteve constante mesmo com a componente fundamental da tensão permanecendo inalterada independentemente da variação na THD_V . Nesse caso, a não-linearidade da carga impossibilitou uma relação linear entre tensão e corrente até mesmo na componente fundamental. Além disso, o aumento na distorção da tensão provocou uma redução em D_g^{CPC} , visto que parte da poluição do sistema tornou-se proveniente da tensão fornecida, não apenas da carga.

A variação da impedância de linha evidenciou que o comportamento de D_g^{CPC} não pode ser associado apenas à fonte de tensão, visto que o efeito do acoplamento entre fonte e carga causou a sua alteração. Além disso, a impedância da linha também provocou a redução de D_g^{CPC} , mesmo mantendo-se as condições da tensão fornecida e da carga. Isto é, o efeito de acoplamento entre fonte e carga deve ser analisado em conjunto com as potências definidas na Teoria CPC para uma análise adequada do circuito. Outrossim, as variações nos valores de D_I^{IEEE} e D_V^{IEEE} indicaram a propagação de harmônicos da corrente para a tensão devido à impedância da linha.

Isto posto, o estudo realizado neste trabalho possibilitou a análise de diferentes efeitos associados às potências definidas na Teoria CPC e na Norma IEEE 1459. Os resultados atestaram que as potências devem ser analisadas em conjunto com o circuito para que não ocorram interpretações equivocadas de seu comportamento. Por exemplo, as variações de D_g^{CPC} e D_I^{IEEE} quando se altera a impedância de linha (condição B) poderiam indicar que a carga estivesse provocando uma distorção menor na corrente, ao contrário do que ocorreu. Por tudo isso, embora seja imprescindível o entendimento dos conceitos relacionados com cada teoria, uma análise assertiva das potências por elas definidas só é possível se efetuada em conjunto com a característica de operação do circuito.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande.

REFERÊNCIAS

Akagi, H., Kanazawa, Y., Fujita, K., and Nabae, A. (1983). Generalized Theory of Instantaneous Reactive Power and Its Application. *Electrical engineering in Japan*, 103(4), 58–66.

Arrillaga, J. and Watson, N.R. (2003). *Power System Harmonics*. Wiley, 2 edition.

Budeanu, C. (1927). Puissances reactives et fictives. *Institut Romain de l'Energie*.

Czarnecki, L.S. (1983). An orthogonal decomposition of the current of non-sinusoidal voltage source applied to non-linear loads. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 11, 235–239.

Czarnecki, L.S. (1985). Considerations on the Reactive Power in Nonsinusoidal Situations. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 34(3), 399–404. doi:10.1109/TIM.1985.4315358.

Czarnecki, L.S. (2008). Currents' Physical Components (CPC) concept: A fundamental of power theory. In *Proceedings of IEEE 2008 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC)*. Lagow, Poland. doi:10.1109/isncc.2008.4627483.

Czarnecki, L.S. (2019). Currents' Physical Components (CPC) - based Power Theory. A Review, Part I: Power Properties of Electrical Circuits and Systems. *Przeegląd Elektrotechniczny*, 1(10), 1–11. doi:10.15199/48.2019.10.01.

Depenbrock, M. (1992). The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations. In *ICHPS V International Conference on Harmonics in Power Systems*, 135–141. IEEE, Atlanta, GA, USA. doi:10.1109/ichps.1992.559009.

Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S., and Beaty, H.W. (2004). *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill, 2 edition.

Emanuel, A.E. (1990). Powers in nonsinusoidal situations—a review of definitions and physical meaning. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(3), 1377–1389. doi:10.1109/61.57980.

Fryze, S. (1932). Active, reactive and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltages and currents. *Przeegląd Elektrotechniczny*.

Fuchs, E. and Masoum, M.A.S. (2015). *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. Academic Press/Elsevier, 2 edition.

IEEE Std. 1459 (2000). IEEE Trial Use Standard for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. *IEEE Std 1459-2000*, 1–44. doi:10.1109/IEEESTD.2000.93398.

IEEE Std. 1459 (2010). IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. *IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000)*, 1–40. doi:10.1109/IEEESTD.2010.5439063.

Sharon, D. (1973). Reactive-power definitions and power-factor improvement in nonlinear systems. *Proceedings IEE*, 120(6), 704–706.

Shepherd, W. and Zakikhani, P. (1972). Suggested Definition of Reactive Power for Nonsinusoidal Systems. *Proceedings IEE*, 119(9), 1361–1362.

Steinmetz, C.P. (1897). *Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena*. The W. J. Johnston co., New York, USA, 1 edition.

Tenti, P. and Mattavelli, P. (2003). A Time-Domain Approach to Power Term Definitions under Non-Sinusoidal Conditions. In *Sixth International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions*, 1–10. Milan, Italy.