

Análise Comparativa Entre as Teorias CPC e CPT para Circuitos Monofásicos

Matheus B. Arcadepani* Alexandre C. Moreira**
Fernando P. Marafão* Helmo K. Morales-Paredes*

* Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI), Universidade Estadual Paulista (UNESP), SP, (e-mail: m.arcadepani@unesp.br; fernando.marafao@unesp.br; helmo.paredes@unesp.br).

** Núcleo de Inovação, Pesquisa e Ensino em Mecatrônica (NIPEM), Universidade Federal de São João del-Rei, MG (e-mail: amoreira@ufsj.edu.br)

Abstract: For the purpose of defining and understanding the power phenomena in electrical circuits, two theories have been highlighted in the literature, the Current's Physical Components (CPC) and the Conservative Power Theory (CPT). Therefore, this paper investigates the main similarities and discrepancies between CPC and CPT through computational simulations of single-phase electrical circuits under sinusoidal and non-sinusoidal voltage conditions. Although the two methods are based on different concepts and domains, the results obtained are very similar. Moreover, this paper tries to explain the causes of similarities based on the decomposition's foundations and the resulting currents values.

Resumo: Com a finalidade de definir e compreender o fenômeno de potência em circuitos elétricos, duas teorias vêm tendo destaque na literatura, a *CPC* (*Current's Physical Components*) e a *CPT* (*Conservative Power Theory*). Portanto, este trabalho investiga as principais semelhanças e discrepâncias entre a *CPC* e *CPT* através de simulações computacionais de circuitos monofásicos sob tensão senoidal e não senoidal. Embora os dois métodos sejam baseados em conceitos e domínios diferentes, os resultados obtidos são muito semelhantes. Além disso, este trabalho tenta explicar as causas das semelhanças com base nos fundamentos da decomposição e nos valores das correntes resultantes.

Keywords: Conservative Power Theory; Current's Physical Components; Non-sinusoidal condition, Single-phase circuits; Power phenomena.

Palavras-chaves: CPT; CPC; Condição não-senoidal, Circuitos monofásicas; Fenômeno de potência.

1. INTRODUÇÃO

Desde o ano de 1865 até os dias de hoje, estudos como Maxwell (1865), Steinmetz (1897), Budeanu (1927), Arseneau et al. (1996), Fryze (1932), Depenbrock (1993), Akagi e Nabae (1993), Tenti e Mattavelli (2004), Czarnecki (2005), Tenti et al. (2010) e IEEE (2010) buscam uma teoria que defina de forma generalizada as potências elétricas com o objetivo de analisar adequadamente aplicações como: condicionamento de energia, medição, tarifação, atribuição de responsabilidade e dentre outras, principalmente, em condições não senoidais e assimétricas Paredes (2011), Marafão (2004). Entretanto, até os dias atuais não existe uma teoria de potência que seja totalmente aceita pela comunidade científica.

Neste contexto, na busca por uma teoria generalizada, duas teorias vêm ganhando bastante destaque, a teoria de Tenti et al. (2010), Paredes (2011), conhecida como *CPT* (*Conservative Power Theory*) e de Czarnecki (2005) conhecida como *CPC* (*Current's Physical Components*). Ambas as teorias decompõem a corrente total em componentes ortogonais entre si, logo, associa-se cada parcela

de corrente a um fenômeno de potência distinto presente no circuito elétrico. Além do mais, é possível verificar a separação que ambas as teorias fazem entre a fonte (distribuidor) e a carga (consumidor) por meio das correntes decompostas. Destaca-se que, Czarnecki, autor da *CPC* é um crítico das várias teorias de potência propostas ao longo dos anos, inclusive da teoria *CPT*, Czarnecki (1987), Czarnecki (2004), Czarnecki (2015) e Czarnecki (2016). Com isso, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre as teorias *CPC* e *CPT* em circuitos elétricos monofásicos, e ainda demonstrar suas equivalências e divergências em condições senoidais e não senoidais, compreendendo suas respectivas interpretações do fenômenos de potência. Além disso, na literatura especializada não se identificam, até o presente momento, estudos comparativos entre as teorias *CPC* e *CPT*.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão resumidas as metodologias de cálculos das componentes de correntes das teorias *CPC* e *CPT*, relacionando cada parcela de corrente a um fenômeno de potência distinto.

2.1 Teoria de Potência Conservativa - CPT

A *CPT*, do inglês *Conservative Power Theory*, proposta por Tenti et al. (2010) e Paredes (2011) é uma teoria desenvolvida no domínio do tempo para circuitos monofásicos e polifásicos sob condição de tensões senoidal ou não senoidal.

A corrente total (i) num circuito monofásico é decomposta em: correntes ativa (i_a), reativa (i_r) e residual (i_v).

$$i = i_a + i_r + i_v, \quad (1)$$

tal que:

- A corrente i_a representa a transferência de trabalho útil da fonte para a carga, encontrada a partir de uma condutância equivalente (G_e) e coincide com a definição estabelecida por Fryze (1932);
- A corrente reativa i_r está relacionada aos elementos armazenadores de energia, ou seja, representa a circulação de reativos no circuito, encontrada a partir de uma reatância equivalente (B_e). Além disso, pode ser relacionada a defasagem entre a tensão e corrente, provocada, por exemplo, por circuitos eletrônicos tistorizados com carga resistiva;
- A corrente residual i_v representa as não linearidades entre a tensão e corrente, ou seja, é a corrente devido a circulação de harmônicos no circuito.

Como a corrente residual representa os componentes de correntes harmônicas resultantes da tensão, bem como as correntes harmônicas geradas pela presença de cargas não lineares, em Paredes (2011) foi proposta uma decomposição adicional para i_v . Para tal foi empregado o domínio da frequência e discutido o fenômeno de potência associado a i_v . Assim, no domínio da frequência, para cada ordem harmônica, é calculado uma corrente ativa e reativa. Logo, a corrente total, demonstrada em (2), é reescrita contendo o somatório das correntes harmônicas ativas (i_{ah}), reativas (i_{rh}) e as harmônicas que só existem no espectro da corrente (i_g):

$$i = \sum_k (i_{ak} + i_{rk}) + \sum_{j \neq k} i_j = i_{ah} + i_{rh} + i_g, \quad (2)$$

onde k é o conjunto de componentes harmônicas comuns entre a tensão e corrente, e j é o conjunto de harmônicas que existem apenas na corrente.

Conforme demonstrado em Paredes (2011) os termos i_{ah} e i_{rh} tem resultados diferentes dos termos i_a e i_r expressos em (1). Assim, a corrente residual pode ser decomposta em corrente ativa dispersa (i_{as}), corrente reativa dispersa (i_{rs}) e corrente harmônica gerada pela carga (i_g):

$$i_v = i_{as} + i_{rs} + i_g, \quad (3)$$

Logo, i_{as} e i_{rs} resultam da consideração dos diferentes valores que a condutância e a reatância apresentam para as diferentes frequências. Em outras palavras, os termos i_{as} e i_{rs} se devem ao fato de que, $G_e \neq \sum_k G_k$ e $B_e \neq \sum_k B_k$.

Assim sendo, de (1) e (3) a corrente total é decomposta como:

$$i = i_a + i_r + i_{as} + i_{rs} + i_g. \quad (4)$$

Como todas as componentes da corrente total são ortogonais entre si, a corrente eficaz total resulta em:

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 + I_{as}^2 + I_{rs}^2 + I_g^2. \quad (5)$$

Por fim, o fator de potência é dado como:

$$\lambda = \frac{I_a}{I} = \frac{I_a}{\sqrt{I_a^2 + I_r^2 + I_{as}^2 + I_{rs}^2 + I_g^2}}. \quad (6)$$

De (6) observa-se que o fator de potência é a relação da corrente ativa com todos os demais termos de corrente por meio da decomposição da corrente total, resultando em um valor unitário apenas no caso de carga puramente resistiva. Caso contrário, a presença de reativos e harmônicas no sistema, influenciarão o fator de potência, diminuindo seu valor.

A Fig. 1 resume a decomposição ortogonal da corrente total por meio da *CPT*. Detalhes adicionais de todo o equacionamento podem ser encontrados em Tenti et al. (2010) e Paredes (2011).

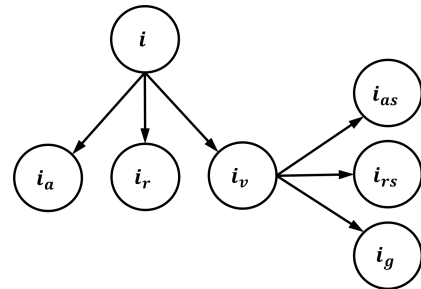


Fig. 1. Diagrama ilustrativo para a decomposição da *CPT*.

2.2 Teoria das Componentes Físicas de Correntes - CPC

A *CPC* do inglês *Current's Physical Components*, proposta por Czarnecki (2005) e Czarnecki (2008) é uma teoria desenvolvida no domínio da frequência para circuitos monofásicos e trifásicos a três condutores.

Para análise dos circuitos monofásicos no domínio da frequência, a admitância (Y_h) é representada em função da condutância, G_h (parte real de Y_h) e a susceptância, B_h (parte imaginária de Y_h) e são calculadas para cada ordem harmônica:

$$Y_h = G_h + jB_h, \quad (7)$$

e, então, a corrente total é dada por:

$$i(t) = Y_0 \cdot V_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \left(\sum_{h \in H} Y_h \cdot V_h \cdot e^{jh\omega_1 t} \right), \quad (8)$$

onde V_0 e $I_0 = Y_0 \cdot V_0$ são os valores CC de $v(t)$ e $i(t)$, h é a ordem harmônica, H contabiliza o conjunto de harmônicos presentes no circuito, V_h é a tensão de cada ordem harmônica, Y_h é a admitância da carga e ω_1 é a frequência angular fundamental.

Para uma carga linear monofásica, a corrente total é decomposta em três parcelas: corrente ativa (i_a), reativa (i_r) e dispersa (i_s).

$$i = i_a + i_r + i_s, \quad (9)$$

Como i_a resulta em uma corrente idêntica à definida por Fryze (1932), para encontrar as parcelas reativa e dispersa, é suficiente subtrair a corrente ativa da corrente total. Logo, a corrente reativa, i_r , é relacionada à susceptância da carga (B_h) e representa o defasamento angular entre a tensão e corrente. Finalmente, a corrente dispersa, i_s , é obtida por meio da operação da diferença da somatória das condutâncias em cada frequência harmônica e a condutância equivalente ($\sum_{h \in H} G_h - G_e$). Observa-se que, por se tratar de uma carga linear, i_s representa a distorção harmônica de corrente imposta pela tensão.

Quando há presença de cargas não lineares, em Czarnecki (2008), o autor da *CPC* define uma quarta parcela denominada de corrente gerada pela carga (i_G). Assim a corrente total (9) deve incluir i_G , resultando em:

$$i = i_a + i_r + i_s + i_G. \quad (10)$$

Como todas as parcelas decompostas são ortogonais entre si, a corrente eficaz total pode ser decomposta como:

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 + I_s^2 + I_G^2. \quad (11)$$

Por último, o fator de potência pela *CPC* pode ser calculado similarmente ao fator de potência da *CPT*, demonstrado em (6), ou seja:

$$\lambda = \frac{I_a}{I} = \frac{I_a}{\sqrt{I_a^2 + I_r^2 + I_s^2 + I_G^2}}. \quad (12)$$

A Fig. 2 ilustra a decomposição ortogonal da corrente total utilizando a *CPC*, sendo i_G a corrente consumida pela carga. Detalhes adicionais do equacionamento da *CPC* podem ser encontrados em Czarnecki (2005), e discussão de estudo de casos, bem como o entendimento do algoritmo da *CPC* em Marcelo et al. (2018).

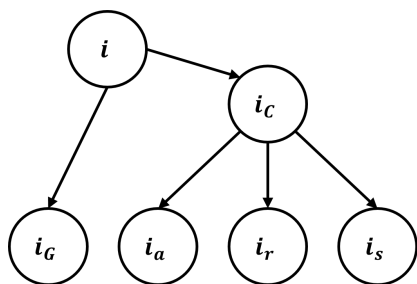


Fig. 2. Diagrama ilustrativo para a decomposição da *CPC*.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

De modo a verificar os conceitos da *CPC* e *CPT*, foram implementados no software MATLAB/SIMULINK um conjunto de casos com diferentes configurações de tensões de alimentação e de cargas. Para a análise no do-

mínio da frequência foi utilizado o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier, do inglês *Fast Fourier Transform* (FFT). Com o intuito dos valores computacionais estarem mais próximos dos valores teóricos (amplitudes e fases das harmônicas), utilizou-se uma frequência de amostragem de 122880 Hz (2048 amostras por ciclo). Assim, visando criar condições representativas de operação, o estudo de casos, além da tensão senoidal (caso 1), considera condições com tensão não senoidal (casos 2, 3 e 4) que incluem harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem. A Tabela 1 apresenta os valores eficazes das amplitudes de cada componente harmônica da tensão. Os valores de distorção harmônica de tensão foram considerados levando-se em conta o limite de 8% para distorção harmônica total (DHT_V) e 5% para harmônicas individuais (DHI_V) conforme sugerido pelo IEEE (2014). Além disso, o valor máximo de (DHT_V) escolhido foi de 11,26% de forma a superar o limite de 10% proposto pela ANEEL (2018).

Tabela 1. Parâmetros da tensão.

Caso	DHT _V (%)	Valor eficaz			
		V ₁	V ₃	V ₅	V ₇
1	0,00	127	-	-	-
2	8,66	127	6,35	6,35	6,35
3	9,95	127	6,35	8,89	6,35
4	11,25	127	8,26	8,26	8,26

Para os casos apresentados, foram simuladas quatro cargas monofásicas. A primeira é uma carga resistiva-indutiva (carga *RL*) com fator de potência igual a 0,80 na fundamental. A segunda carga é a mesma carga *RL*, porém, considerando a conexão de um capacitor em paralelo para corrigir o fator de potência para 1,0 na fundamental (carga *RL*// $C_{1,0}$). A terceira carga é igual a segunda, entretanto, com o capacitor compensando o fator de potência para 0,95 na fundamental (carga *RL*// $C_{0,95}$). Por fim, a quarta carga é uma carga não linear do tipo fonte de corrente harmônica (carga *FCH*), composta por um retificador de onda completa e um resistor em série com o indutor. A Tabela 2 apresenta os parâmetros de cada carga simulada.

Tabela 2. Parâmetros das cargas simuladas.

Cargas	Resistor (Ω)	Indutor (mH)	Capacitor (μF)
<i>RL</i>	1,0323	2,0537	-
<i>RL</i> // $C_{1,0}$	1,0323	2,0537	1233,50
<i>RL</i> // $C_{0,95}$	1,0323	2,0537	692,90
<i>FCH</i>	17,920	41,082	-

Com o objetivo de verificar os valores das correntes para cada teoria de potência e analisar seu comportamento, as cargas (Tabela 2) foram avaliadas individualmente para os casos apresentados na Tabela 1. As Fig. 3, 4 e 5 ilustram os circuitos considerados para as simulações.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para cada carga e casos são apresentados nas Tabelas 3, 4, 5 e 6. A seguir serão apresentadas algumas discussões com relação à interpretação dos valores obtidos e sua análise comparativa.

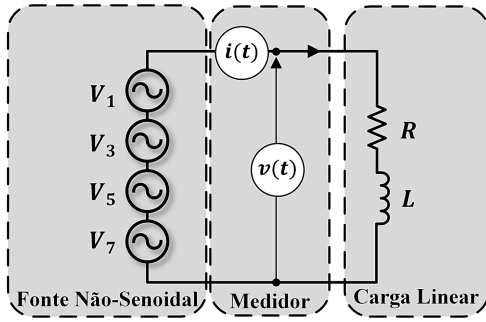


Fig. 3. Carga RL .

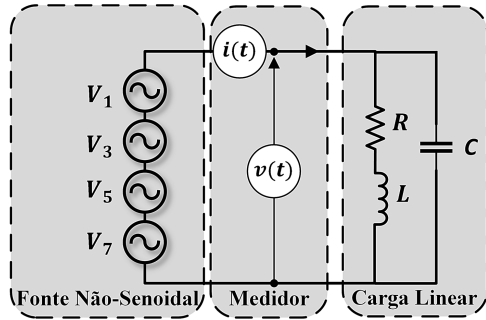


Fig. 4. Carga $RL//C$.

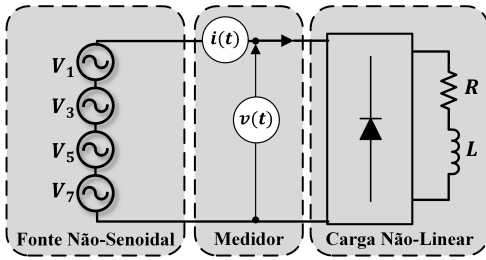


Fig. 5. Carga FCH .

4.1 Carga RL

Como se pode observar na Tabela 3, as correntes ativas resultaram iguais para os quatro casos, ou seja, independente da tensão ser senoidal ou não, $I_{a,CPT} = I_{a,CPC}$. O mesmo acontece para as correntes ativas dispersa da CPT e corrente dispersa da CPC ($I_{as,CPT} = I_{s,CPC}$). Por outro lado, as correntes reativas, resultaram iguais para a condição senoidal ($I_{r,CPT} = I_{r,CPC}$) e aproximadamente iguais para os casos onde a tensão é não senoidal ($I_{r,CPT} \approx I_{r,CPC}$). Observa-se que, a ligeira diferença entre $I_{r,CPT}$ e $I_{r,CPC}$ é devido ao surgimento da corrente reativa dispersa da CPT , ou seja, $\sqrt{I_{r,CPT}^2 + I_{rs,CPT}^2} = I_{r,CPC}$. Finalmente, como esperado, por ser uma carga linear e não gerar harmônicas, as correntes geradas são iguais a zero ($I_{g,CPT}$ e $I_{G,CPC} = 0$). Além disso, percebe-se que os fatores de potência são iguais entre as teorias ($\lambda_{CPT} = \lambda_{CPC}$) e diminuem ligeiramente conforme a distorção harmônica na tensão aumenta.

4.2 Carga $RL//C_{1,0}$

Analisando a Tabela 4, ao adicionar o capacitor em paralelo, o fator de potência na fundamental resulta unitário (caso 1), ou seja, $I = I_{a,CPT} = I_{a,CPC}$. Além disso,

observa-se que, as correntes ativas continuam sendo iguais para as condições de tensão não senoidal (casos 2, 3 e 4), ou seja, $I_{a,CPT} = I_{a,CPC}$. O mesmo acontece para as correntes ativas dispersa e corrente dispersa ($I_{as,CPT} = I_{s,CPC}$). Já a corrente reativa devido a distorção de tensão (casos 2, 3 e 4) que promove um incremento (amplificação) na distorção de corrente, resultaram diferentes, ou seja, $I_{r,CPT} \neq I_{r,CPC}$.

Tabela 3. Correntes da CPT e CPC para a carga RL .

Correntes (A)	Casos			
	1	2	3	4
I	98,42	98,47	98,48	98,51
I_a	78,74	78,52	78,45	78,38
I_r	59,05	59,10	59,11	59,14
I_{as}	0,00	5,88	6,81	7,63
I_{rs}	0,00	1,75	1,98	2,28
I_g	0,00	0,00	0,00	0,00
λ	0,800	0,797	0,797	0,796
I	98,42	98,47	98,48	98,51
I_a	78,74	78,52	78,45	78,38
I_r	59,05	59,13	59,15	59,18
I_s	0,00	5,88	6,81	7,63
I_G	0,00	0,00	0,00	0,00
λ	0,800	0,797	0,797	0,796

Tabela 4. Correntes da CPT e CPC para a carga $RL//C_{1,0}$.

Correntes (A)	Casos			
	1	2	3	4
I	78,74	82,47	83,48	84,95
I_a	78,74	78,52	78,45	78,38
I_r	0,00	0,39	0,51	0,65
I_{as}	0,00	5,88	6,81	7,63
I_{rs}	0,00	24,49	27,71	31,84
I_g	0,00	0,00	0,00	0,00
λ	1,000	0,952	0,940	0,923
I	78,74	82,47	83,48	84,95
I_a	78,74	78,53	78,45	78,38
I_r	0,00	24,50	27,72	31,85
I_s	0,00	5,88	6,81	7,62
I_G	0,00	0,00	0,00	0,00
λ	1,000	0,952	0,940	0,923

É interessante observar que a corrente reativa da CPT foi compensada totalmente para o caso senoidal, e para os casos 2, 3, e 4 (não senoidal) resultaram praticamente igual a zero ($I_{r,CPT} \approx 0$). Nestes casos os reativos não foram compensados na íntegra devido ao capacitor ser projetado na frequência fundamental. Para a compensação total de $I_{r,CPT}$, o capacitor deve ser projetado com base na energia reativa conforme sugerido em Tenti et al. (2010) e Paredes (2011) ou pela compensação da corrente reativa instantânea ($i_{r,CPT}(t)$) utilizando estratégias de filtragem ativa conforme proposto em Marafão et al. (2015) e Bonaldo et al. (2016).

Outra observação, é que para a condição não senoidal (casos 2, 3 e 4), a corrente reativa dispersa da CPT é aproximadamente igual a corrente reativa da CPC ($I_{rs,CPT} \approx I_{r,CPC}$). Além disso, a amplificação harmônica provocada pelas harmônicas da tensão na carga $RL//C_{1,0}$ resulta no aumento do valor eficaz de $I_{rs,CPT}$ e $I_{r,CPC}$. Observe que, similar à carga RL sob condição não senoidal, a equivalência entre os reativos para ambas as teorias

pode ser alcançada por, $\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC}$. Novamente, por ser uma carga linear, as correntes geradas pela carga são iguais a zero ($I_{g_CPT} = I_{G_CPC} = 0$). Por fim, os fatores de potência entre as teorias são iguais ($\lambda_{CPT} = \lambda_{CPC}$) e diminuem conforme aumenta a DHT_V .

4.3 Carga RL//C_{0,95}

Esta configuração da carga é uma variante da carga anterior ($RL//C_{1,0}$). Neste caso, a instalação do capacitor foi para correção do fator de potência na fundamental de 0,80 para 0,95. Assim, o que altera apenas é o valor do capacitor utilizado.

Conforme esperado, para o caso 1 (tensão senoidal), observando a Tabela 5, os valores das correntes ativas e reativas são iguais em ambas às teorias ($I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$ e $I_{r_CPT} = I_{r_CPC}$). Além disso, agora as correntes reativas da *CPT* e *CPC* são diferente de zero uma vez que não foram compensados totalmente. Já para os casos 2, 3 e 4 (tensão não senoidal), observa-se que, além de preservar as equivalências analisadas entre as teorias, para as cargas anteriores (ou seja, $I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$ e $\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC}$), nota-se que, no caso da *CPT*, em função da compensação não ser total, agora a corrente reativa (I_{r_CPT}) é maior que a corrente reativa dispersa (I_{rs_CPT}).

Tabela 5. Correntes da CPT e CPC para a carga RL//C_{0,95}.

Correntes (A)	Casos				
	1	2	3	4	
CPT	I	82,88	83,86	84,13	84,54
	I_a	78,74	78,52	78,45	78,38
	I_r	25,88	25,69	25,62	25,55
	I_{as}	0,00	5,88	6,81	7,63
	I_{rs}	0,00	13,14	14,83	17,09
	I_g	0,00	0,00	0,00	0,00
	λ	0,950	0,936	0,933	0,927
CPC	I	82,88	83,86	84,13	84,54
	I_a	78,74	78,52	78,45	78,38
	I_r	25,88	28,85	29,60	30,74
	I_s	0,00	5,88	6,81	7,63
	I_G	0,00	0,00	0,00	0,00
	λ	0,950	0,936	0,933	0,927

4.4 Carga FCH

Observando a Tabela 6, as correntes ativas são iguais em todas as condições analisadas ($I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$), o mesmo se repete para a corrente ativa dispersa e corrente dispersa ($I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$). Para o caso senoidal, as correntes reativas são iguais entre as teorias ($I_{r_CPT} = I_{r_CPC}$), entretanto, para o caso não senoidal, resultam diferentes. Essa diferença entre I_{r_CPT} e I_{r_CPC} é devido ao surgimento da corrente reativa dispersa da *CPT*, ou seja, $\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC}$. Por ser uma carga não linear e gerar harmônicas na corrente, as correntes harmônicas geradas pela carga são iguais entre as teorias e diferente de zero ($I_{g_CPT} = I_{G_CPC} \neq 0$). Além disso, os fatores de potência são equivalentes ($\lambda_{CPT} = \lambda_{CPC}$) e aumentam conforme se tem o incremento da distorção de tensão.

Através dos resultados obtidos para as cargas *RL*, *RL//C* e *FCH*, verifica-se que, para a condição de tensão não

Tabela 6. Correntes da CPT e CPC para a carga FCH.

Correntes (A)	Casos				
	1	2	3	4	
CPT	I	6,56	6,72	6,74	6,77
	I_a	6,07	6,35	6,38	6,43
	I_r	1,18	1,00	0,98	0,95
	I_{as}	0,00	1,42	1,39	1,32
	I_{rs}	0,00	0,49	0,49	0,47
	I_g	2,18	1,24	1,25	1,27
	λ	0,926	0,945	0,947	0,950
CPC	I	6,56	6,72	6,74	6,77
	I_a	6,07	6,35	6,38	6,43
	I_r	1,18	1,11	1,09	1,06
	I_s	0,00	1,42	1,39	1,32
	I_G	2,18	1,24	1,25	1,26
	λ	0,926	0,945	0,947	0,950

senoidal, existe uma relação de equivalência entre as correntes associadas aos reativos ($\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC}$). No caso da *CPT*, mesmo que a corrente reativa, i_{r_CPT} leve em conta uma reatividade equivalente (B_e) que considera as harmônicas comuns entre $\hat{v}(t)$ e $i(t)$, apresentado em Paredes (2011), a corrente i_{r_CPT} não inclui o efeito dos diferentes valores de reatividade (B_k) provocadas pelas harmônicas individuais de $\hat{v}(t)$ e $i(t)$, ou seja, $B_e \neq \sum_k B_k$, sendo $\hat{v}(t)$ a integral sem valor médio da tensão. Essa diferença ($\Delta B = \sum_k B_k - B_e$) se manifesta na corrente reativa dispersa (i_{rs_CPT}). Já a corrente reativa da *CPC* (i_{r_CPC}) inclui ambos os efeitos, ou seja, a susceptância devido às harmônicas comuns de $v(t)$ e $i(t)$ e os valores diferentes das susceptância devido às harmônicas individuais de $v(t)$ e $i(t)$ ($B_{e_CPC} = \sum_{h \in H} B_h$).

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma análise comparativa do fenômeno de potência através das teorias de potência *CPC* e *CPT*. Os resultados para circuitos monofásicos lineares e não linear, mostraram que, na condição de tensão não senoidal, as correntes ativas (i_{a_CPC} e i_{a_CPT}) e as correntes ativa dispersa (i_{as_CPT} e i_{s_CPT}) são iguais em todos os casos analisados. Entretanto, a equivalência entre as componentes reativas pode ser alcançada mediante a associação das correntes reativas (i_{r_CPC} e i_{r_CPT}) e corrente reativa dispersa (i_{rs_CPT}). Em resumo foi mostrado que:

$$I_{a_CPC} = I_{a_CPT}, \quad (13)$$

$$I_{s_CPC} = I_{as_CPT}, \quad (14)$$

$$I_{r_CPC} = \sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2}, \quad (15)$$

$$I_{G_CPC} = I_{g_CPT} \quad (16)$$

De (13)-(16), pode-se concluir que, as teorias *CPT* e *CPC*, embora definidas de forma diferente são equivalente e possuem interpretações do fenômeno de potência semelhantes. É importante salientar que foi fundamental a decomposição adicional da corrente residual da *CPT* no domínio da frequência para alcançar a equivalência demonstrada entre

as teorias. Além disso, estudos complementares deverão ser feitos com intuito de expandir a análise comparativa para outras cargas não lineares alimentadas com tensões senoidais e não senoidais.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo CNPq mediante o Processo No. 309297/2021-4, pela FAPESP, Processo No 2016/08645-9, e pela CAPES, código financeiro 001.

REFERÊNCIAS

- Akagi, H. e Nabae, A. (1993). The p-q theory in three-phase systems under non-sinusoidal conditions. *European Transactions on Electrical Power*, 3(1), 27–31. doi: <https://doi.org/10.1002/etep.4450030106>.
- ANEEL (2018). Procedimentos de distribuição de energia, módulo 8—qualidade da energia elétrica. *Agência Nacional de Energia Elétrica—ANEEL*.
- Arseneau, R., Baghzouz, Y., Belanger, J., et al. (1996). A survey of north american electric utility concerns regarding nonsinusoidal waveforms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(1), 73–78. doi:10.1109/61.484003.
- Bonaldo, J.P., Paredes, H.K.M., e Pomílio, J.A. (2016). Control of single-phase power converters connected to low-voltage distorted power systems with variable compensation objectives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(3), 2039–2052. doi:10.1109/TPEL.2015.2440211.
- Budeanu, C.I. (1927). *Reactive and fictitious power*. Instituto Romeno de Energia.
- Czarnecki, L.S. (1987). What is wrong with the budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IM-36(3), 834–837. doi:10.1109/TIM.1987.6312797.
- Czarnecki, L.S. (2004). On some misinterpretations of the instantaneous reactive power p-q theory. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(3), 828–836. doi:10.1109/TPEL.2004.826500.
- 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*, XI(2), 3–14.
- Czarnecki, L.S. (2008). Currents' physical components (cpc) concept: A fundamental of power theory. *International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, 1–11. doi:10.1109/ISNCC.2008.4627483.
- Czarnecki, L.S. (2015). Critical comments on the conservative power theory (cpt). In *2015 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC)*, 1–7. doi:10.1109/ISNCC.2015.7174713.
- Czarnecki, L.S. (2016). What is wrong with the conservative power theory (cpt). In *2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, 1–6. doi:10.1109/ICATE.2016.7754619.
- Depenbrock, M. (1993). The fbd-method, a generally applicable tool for analyzing power relations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(2), 381–387. doi:10.1109/59.260849.
- Fryze, S. (1932). Active, reactive and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current. *Przeglad Elektrotechniczny*.
- IEEE (2010). Ieee standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, non-sinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. *IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000)*, 1–50. doi:10.1109/IEEESTD.2010.5439063.
- IEEE (2014). Ieee recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. *IEEE 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, 1–29. doi:10.1109/IEEESTD.2014.6826459.
- Marafão, F.P. (2004). *Análise e controle da energia elétrica através de técnicas de processamento digital de sinais*. Tese de doutorado, Universidade de Campinas.
- Marafão, F.P., Brandão, D.I., Costabeber, A., e Paredes, H.K.M. (2015). Multi-task control strategy for grid-tied inverters based on conservative power theory. *IET Renewable Power Generation*, 9, 154–165. doi:10.1049/iet-rpg.2014.0065.
- Marcelo, A.B., Risomar, A.A.S., Marcelo, N.T., et al. (2018). Currents' physical components (cpc): Case studies in single phase systems. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 1–6.
- Maxwell, J.C. (1865). A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155, 459–512.
- Paredes, H.K.M. (2011). *Teoria de potência conservativa: uma nova abordagem para o controle cooperativo de condicionadores de energia e considerações sobre atribuição de responsabilidades*. Tese de doutorado, Universidade de Campinas.
- Steinmetz, C.P. (1897). *Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena*. New York: McGrawHill.
- Tenti, P. e Mattavelli, P. (2004). A time-domain approach to power term definitions under non-sinusoidal conditions. *L'Energia Elettrica*, 81, 75–84.
- Tenti, P., Mattavelli, P., e Paredes, H.K.M. (2010). Conservative power theory, sequence components and accountability in smart grids. *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 86(6), 30–37.