

Desenvolvimento de sistema de aquisição para análise de potência utilizando a plataforma hardware-in-the-loop

Development of an acquisition system for power analysis using the hardware-in-the-loop platform

Jhonatan F. Pereira¹, Anderson A. Dionizio², Sérgio A. O. da Silva³, Wesley A. de Souza⁴

RESUMO

Este artigo apresenta uma abordagem comparativa envolvendo a teoria da potência ativa e reativa instantânea (teoria PQ) e a teoria da potência conservativa (CPT), empregadas na análise e medição de grandezas de potência em sistemas trifásicos a quatro-fios (ST-4F), operando sob condições senoidais, não senoidais, equilibradas e desequilibradas, alimentando cargas lineares (resistivas e indutivas) bem como não lineares, ambas balanceadas e desbalanceadas. Neste contexto, as grandezas de potência são extraídas a partir de cada teoria de potência usando um analisador de potência empregando a tecnologia *hardware-in-the-loop* (HIL), de modo a se estabelecer qual das teorias em estudo é capaz de retratar com mais precisão as medições de potência realizadas em um ST-4F operando sob condição adversas.

PALAVRAS-CHAVE: *hardware-in-the-loop*, teoria da potência conservativa, teoria PQ.

ABSTRACT

This paper presents a comparative approach involving the Instantaneous active and reactive power theory (PQ theory) and the conservative power theory (CPT) applied in the analysis and measurement of power quantities in four-wire three-phase systems (ST-4F) operating under sinusoidal, non-sinusoidal, balanced, and unbalanced conditions, supplying both linear (resistive and inductive) and non-linear loads, both balanced and unbalanced. In this context, power quantities are extracted from each power theory using a power analyzer employing hardware-in-the-loop (HIL) technology, to establish which of the theories under study is capable of more accurately depicting power measurements conducted in an ST-4F operating under adverse conditions.

KEYWORDS: *hardware-in-the-loop*, conservative power theory, PQ theory.

INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica apresenta muitos benefícios à sociedade, porém tem contribuído no agravamento de distúrbios na qualidade da energia (BAJAJ e SINGH, 2020). Observa-se assim uma crescente demanda para a quantificação, caracterização e identificação destes distúrbios na rede elétrica, visando a análise e possibilidades de mitigação. Para tais objetivos, tem-se como possível ferramenta as teorias de potência.

A teoria de potência ativa e reativa instantânea, também conhecida como teoria PQ, é baseada na transformação de Clarke. Ela permite a decomposição dos componentes de corrente e potência em componentes ativos, reativos e harmônicos, o que é frequentemente utilizado em estratégias de compensação que podem atuar nas partes médias e oscilantes

¹ Mestrando no Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: jhonatanpereira@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 2400210662453209.

² Doutorando no Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: dionizio@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 9946117111367840.

³ Docente no Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: augus@utfpr.edu.br. ID Lattes: 7428189879295593.

⁴ Docente no Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: wesleyangelino@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8594457321079718.

das potências reativas e ativas (AKAGI, WATANABE, AREDES, 2017). Em contrapartida, a teoria de potência conservativa (CPT) considera não linearidades, desequilíbrios e harmônicos. A CPT divide a potência em parcelas conservativas e dissipativas, o que permite aplicações complexas de carga e avaliações detalhadas.

Considerando as características da teoria PQ e da CPT, este trabalho tem como objetivo avaliar os indicadores de potência, a saber: A (potência aparente da CPT); P (potência ativa da CPT); Q (potência reativa da CPT); N_a (potência de desequilíbrio ativa); N_r (potência de desequilíbrio reativa); N (potência de desequilíbrio coletiva); D (potência não linear); λ (fator de potência da CPT); $A_{\alpha\beta 0}$ (potência aparente da PQ); $P_{\alpha\beta}$ (potência ativa da PQ); $Q_{\alpha\beta}$ (potência reativa da PQ); $FP_{\alpha\beta}$ (fator de potência da PQ); e (\bar{P}_0) (potência ativa média no eixo 0) como potenciais grandezas de observação de características para diferentes perfis de cargas. Este trabalho também compara os resultados para diferentes configurações de rede e carga usando HIL.

Desta forma, as seções posteriores apresentam a formulação das teorias de potência, a metodologia e procedimento experimental proposto, bem como os resultados e discussões.

METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a formulação matemática das teorias de potência e o método de análise proposto neste trabalho.

TEORIA PQ

No referencial estacionário, a potência ativa trifásica ($p_{3\phi}$) pode ser determinada através das coordenadas abc de tensão e corrente ou a partir das coordenadas do eixo $\alpha\beta 0$, conforme a Eq. (1).

$$p_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0. \quad (1)$$

A teoria PQ para sistemas de quatro fios é proposta em AKAGI, OGASAWARA e KIM (1999), onde as tensões e correntes nas coordenadas $\alpha\beta 0$ indicam a sequência zero (p_0), a potência real (p) e a potência imaginária (q), conforme apresenta a Eq. (2).

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

As respectivas potências podem ser decompostas em componentes médias e oscilatórias, da seguinte forma: $p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0$, $p = \bar{p} + \tilde{p}$, e $q = \bar{q} + \tilde{q}$.

As componentes médias estão presentes em todos os cenários de fontes e cargas. Por outro lado, as componentes oscilatórias não aparecem quando tanto as fontes quanto as cargas são senoidais e balanceadas. Nesse caso, é necessário fazer uma análise no desequilíbrio da fonte ou da carga. A potência aparente ($A_{\alpha\beta 0}$) depende da potência média ($P_{\alpha\beta} + P_0$) e da potência média reativa ($Q_{\alpha\beta}$).

O fator de potência ($\lambda_{\alpha\beta 0}$) pode ser obtido a partir da potência média e da potência aparente. A potência harmônica (H) é proposta em WATANABE, STEPHA e AREDES (1993) e representa todas as não-linearidades e desequilíbrios de carga obtidos a partir das componentes oscilatórias ativas e eficazes, de acordo com a Eq. (3).

$$A_{\alpha\beta 0} = \sqrt{(P_{\alpha\beta} + P_0)^2 + Q_{\alpha\beta}^2} \quad \lambda_{\alpha\beta 0} = \frac{P_{\alpha\beta} + P_0}{A_{\alpha\beta 0}} \quad (3)$$

TEORIA CPT

A potência coletiva instantânea (p) e a reativa (w_r) em sistemas polifásicos com n fios podem ser descritas pela Eq. (4).

$$p = \sum_{\mu=1}^n v_{\mu} i_{\mu} \quad w_{r\mu} = \sum_{\mu=1}^n \hat{v}_{\mu} i_{\mu} \quad (4)$$

As correntes são decompostas em partes ativa (\underline{i}_a), reativa (\underline{i}_r) e residual (\underline{i}_d). As correntes ativas e reativas são determinadas pela Eq. (5).

$$\underline{i}_a = \sum_{\mu=1}^n \frac{\langle v_{\mu}, i_{\mu} \rangle}{V_{\mu}^2} v_{\mu} = \sum_{\mu=1}^n \frac{P_{\mu}}{V_{\mu}^2} v_{\mu} \quad \underline{i}_r = \sum_{\mu=1}^n \frac{\langle \hat{v}_{\mu}, i_{\mu} \rangle}{\hat{V}_{\mu}^2} \hat{v}_{\mu} = \sum_{\mu=1}^n \frac{W_{\mu}}{\hat{V}_{\mu}^2} \hat{v}_{\mu} \quad (5)$$

As correntes ativas e reativas são subdivididas em componentes balanceados (\underline{i}_a^b e \underline{i}_r^b) e desbalanceados (\underline{i}_a^u e \underline{i}_r^u). As parcelas balanceadas são definidas na Eq. (6).

$$\underline{i}_a^b = \frac{\langle \underline{v}, \underline{i} \rangle}{V^2} \underline{v} = \frac{P}{V^2} \underline{v} \quad \underline{i}_r^b = \frac{\langle \underline{\hat{v}}, \underline{i} \rangle}{\hat{V}^2} \underline{\hat{v}} = \frac{W}{\hat{V}^2} \underline{\hat{v}} \quad (6)$$

Os componentes de corrente desbalanceados podem ser descritos como $\underline{i}_a^u = \underline{i}_a - \underline{i}_a^b$, $\underline{i}_r^u = \underline{i}_r - \underline{i}_r^b$. Por outro lado, a corrente residual (\underline{i}_d) aparece quando têm-se cargas não lineares e lineares (exceto resistivas) com tensões desbalanceadas, como $\underline{i}_d = \underline{i} - \underline{i}_a - \underline{i}_r$.

As potências ativa e reativa são calculadas como $P = VI_a^b$ e $Q = VI_r^b$, respectivamente. A potência de desbalanço (N) é subdividida em parte ativa (N_a) e reativa (N_r) que são relacionadas com o desequilíbrio de cada carga, onde $N = N_a + N_r = V I_a^u + V I_r^u$.

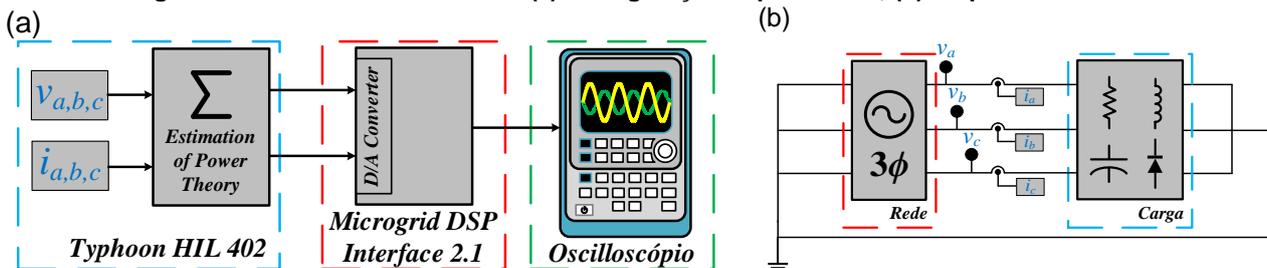
A potência residual (D) relaciona-se com a corrente residual, calculada por $D = VI_d$. O fator de potência (λ) pode ser influenciado pela presença de reativos, desequilíbrios e não linearidades no circuito (SOUZA et al., 2018). O fator de potência e a potência aparente são obtidos através da Eq. (7).

$$A = \sqrt{P^2 + Q^2 + N^2 + D^2} \quad \lambda = \frac{P}{A} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + N^2 + D^2}} \quad (7)$$

MÉTODO

As teorias de potência foram implementadas na plataforma Typhoon® HIL402, que emula um analisador de potência mostrado na Figura 1. Um osciloscópio adquire os indicadores de potência mencionados anteriormente do HIL. A estrutura do circuito de quatro fios utilizado é mostrada na Figura 1(b). Os parâmetros da fonte estão organizados no Quadro 1, enquanto os parâmetros de carga estão organizados no Quadro 2.

Figura 1 - Analisador de Potência: (a) Configuração Experimental; (b) Esquema Elétrico.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).



Quadro 1 - Configurações da Tensão da Rede Elétrica.

A. Tensão Senoidal Balanceada: $V_{RMS} = 127V$.
B. Tensão Não Senoidal Balanceada: Fundamental com $V_{RMS} = 127V$ mais tensões harmônicas de 3º, 5º, e 7º ordens com amplitudes equivalente à 5% da tensão fundamental por fase.
C. Tensão Senoidal Desbalanceada: Tensões de fase $V_a = 1,1V_{RMS}$; $V_b = V_{RMS}$; $V_c = 0,9V_{RMS}$.
D. Tensão Não Senoidal Desbalanceada: Fundamental com $V_a = 1,1V_{RMS}$; $V_b = 1,0V_{RMS}$; $V_c = 0,9V_{RMS}$ mais tensões harmônicas de 3º, 5º, e 7º ordens com amplitudes equivalente à 5% da tensão fundamental por fase.

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Quadro 2 - Configurações das Cargas lineares e Não-lineares.

1. Resistiva Balanceada ($R = 8,5\Omega$).
2. Resistiva Desbalanceada ($R_a = 11,8\Omega$; $R_b = 5,9\Omega$; $R_c = 8,5\Omega$).
3. RL Balanceada ($R_a = R_b = R_c = 8,5\Omega$; $L_a = L_b = L_c = 15mH$).
4. RL Desbalanceada ($R_a = 11,8\Omega$; $R_b = 5,9\Omega$; $R_c = 8,5\Omega$; $L_a = 20mH$; $L_b = 10mH$; $L_c = 15mH$).
5. Não Linear Balanceada ($L_a = L_b = L_c = 15mH$); três retificadores monofásicos à diodos alimentando um circuito RC; Resistência ($R_a = R_b = R_c = 8,5\Omega$); Capacitância ($C_a = C_b = C_c = 100\mu F$).
6. Não Linear Desbalanceada ($L_a = 20mH$; $L_b = 10mH$; $L_c = 15mH$); três retificadores monofásicos à diodos alimentando um circuito RC; Resistência ($R_a = 11,8\Omega$; $R_b = 5,9\Omega$; $R_c = 8,5\Omega$); Capacitores ($C_a = 220\mu F$; $C_b = 370\mu F$; $C_c = 100\mu F$).

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

RESULTADOS

A análise dos cenários é composta pelas combinações entre os parâmetros de rede e carga apresentados no Quadro 1 e Quadro 2, respectivamente. Os resultados da CPT são apresentados no Quadro 3, enquanto da teoria PQ no Quadro 4. Na condição de alimentação 'A', é observa-se a convergência entre as duas teorias com cargas balanceadas R e RL . Mas, quando não linearidades são incluídas no sistema, as teorias divergem ligeiramente, e ao inserir cargas desequilibradas, ocorre maiores divergências.

A partir da condição de alimentação 'B' é necessário efetuar uma correção na potência ativa, somando-se a parcela média da potência ativa de sequência zero ($P_{\alpha\beta} + \bar{P}_0$) devido à introdução da componente de tensão v_0 , a qual aparece em função de desbalanços ou distorção da rede. Mesmo assim, podemos visualizar que a teoria PQ diverge ainda mais da CPT, por misturar os desbalanços da rede nas parcelas de potência.

Na condição de alimentação 'C', têm-se a introdução da componente v_0 no sistema a partir da adição de harmônicos na fonte. Com a CPT pode-se visualizar a influência das distorções na rede através da parcela de potência residual D , por outro lado, na teoria PQ essas distorções misturam-se às parcelas médias e oscilantes, tornando-se impossível visualizar o impacto dos harmônicos individualmente. No entanto, é possível visualizar um pequeno aumento na diferença entre as parcelas de potência que compõem ambas teorias.

A condição de alimentação 'D' é a pior condição de rede e carga testados, a qual mostra a interferência da junção de todos os problemas que causam a divergência entre as teorias. Em AREDES et al. (2009) é proposta uma solução para o problema das componentes de sequência zero da teoria PQ usando um algoritmo PLL (*Phase Locked Loop*) para detecção do ângulo de fase da rede. Com este algoritmo é possível obter as componentes de sequência positiva ou negativa da tensão da rede e garantir compensação dos harmônicos inseridos nas parcelas de tensão ou corrente.



Quadro 3: Indicadores de Potência da CPT.

Casos	$A(kVA)$	$P(kW)$	$Q(kVar)$	$D(kVA)$	$N(kVA)$	N_a	N_r	λ
A.1	5,693	5,693	0,072	0,072	0,000	0,000	0,000	1,000
A.2	6,231	5,998	0,072	0,070	1,688	1,688	0,022	0,963
A.3	4,740	3,946	2,576	0,064	0,000	0,000	0,000	0,839
A.4	5,233	4,227	2,683	0,063	1,418	1,205	0,748	0,808
A.5	5,402	4,765	2,461	0,356	0,000	0,000	0,000	0,882
A.6	6,228	4,863	3,275	0,886	1,790	1,415	1,097	0,781
B.1	5,730	5,730	0,071	0,071	0,000	0,000	0,000	1,000
B.2	6,182	5,925	0,073	0,077	1,762	1,762	0,021	0,958
B.3	4,771	3,972	2,593	0,059	0,033	0,018	0,028	0,832
B.4	5,194	4,181	2,648	0,065	1,479	1,254	0,783	0,805
B.5	5,439	4,798	2,477	0,358	0,000	0,000	0,000	0,882
B.6	6,197	4,783	3,297	0,903	1,846	1,484	1,099	0,772
C.1	5,735	5,735	0,072	0,072	0,000	0,000	0,000	1,000
C.2	6,278	6,043	0,075	0,078	1,701	1,701	0,021	0,963
C.3	4,760	3,950	2,588	0,311	0,000	0,000	0,000	0,830
C.4	5,256	4,232	2,696	0,346	1,422	1,207	0,752	0,805
C.5	5,398	4,740	2,483	0,454	0,032	0,020	0,025	0,878
C.6	6,200	4,742	3,269	0,815	1,790	1,458	1,039	0,781
D.1	5,774	5,774	0,070	0,072	0,000	0,000	0,000	1,000
D.2	6,227	5,969	0,070	0,072	1,775	1,775	0,022	0,959
D.3	4,792	3,977	2,606	0,313	0,000	0,000	0,000	0,823
D.4	5,217	4,186	2,660	0,343	1,482	1,256	0,786	0,803
D.5	5,432	4,769	2,502	0,450	0,030	0,022	0,022	0,878
D.6	6,166	4,759	3,294	0,822	1,849	1,529	1,039	0,772

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Quadro 4: Indicadores de Potência da PQ.

Casos	$S_{\alpha\beta} (kVA)$	$P_{\alpha\beta} + \bar{P}_0 (kW)$	$Q_{\alpha\beta} (kVar)$	$F_{\alpha\beta}$	$\bar{P}_0 (kW)$
A.1	5,693	5,693	0,000	1,000	0,000
A.2	5,998	5,998	0,000	1,000	0,000
A.3	4,740	3,946	2,626	0,832	0,000
A.4	5,035	4,227	2,737	0,839	0,000
A.5	5,391	4,765	2,520	0,884	0,000
A.6	5,897	4,863	3,335	0,824	0,000
B.1	5,730	5,730	0,000	1,000	0,019
B.2	5,925	5,925	0,065	0,998	-0,010
B.3	4,757	3,972	2,617	0,835	0,013
B.4	5,011	4,181	2,763	0,834	-0,035
B.5	5,515	4,798	2,512	0,886	0,016
B.6	5,857	4,783	3,381	0,816	0,016
C.1	5,735	5,735	0,000	1,000	0,043
C.2	6,043	6,043	0,065	1,000	0,045
C.3	4,743	3,950	2,626	0,833	0,005
C.4	5,039	4,232	2,736	0,840	0,005
C.5	5,375	4,740	2,535	0,882	0,005
C.6	5,874	4,842	3,324	0,882	0,021
D.1	5,774	5,774	0,000	1,000	0,062
D.2	5,969	5,969	0,064	1,000	0,034
D.3	4,761	3,977	2,617	0,835	0,017
D.4	5,015	4,186	2,763	0,835	-0,030
D.5	5,398	4,769	2,528	0,883	0,021
D.6	5,832	4,759	3,371	0,816	-0,036

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).



Percebe-se que ambas as teorias apresentam a separação das parcelas de potência em ativa e reativa (P e Q) para CPT, ($P_{\alpha\beta}$ e $Q_{\alpha\beta 0}$) para a teoria PQ. A CPT ainda representa não linearidades do sistema a partir da potência residual D , e desbalanços através da potência de desbalanço N que divide-se em ativa N_a e reativa N_r . No caso da teoria PQ, as parcelas de potência são expostas em parcelas médias e oscilantes (\bar{p} , \bar{q} , \tilde{p} e \tilde{q}), todavia, os efeitos das não linearidades e desequilíbrios misturam-se nas referidas parcelas.

Dado o contexto, a CPT por separar as parcelas de potência relacionadas a não linearidades através da potência residual D , permite uma análise mais detalhada a partir das características do circuito, bem como a quantificação do desbalanço ativo e reativo a partir de N_a e N_r .

CONCLUSÕES

Este artigo comparou as teorias CPT e PQ para circuitos à quatro fios com configurações específicas de carga e fonte. A teoria CPT representa as não linearidades da potência residual (D) e os desequilíbrios da potência desequilibrada (N).

Em contraste, a teoria PQ combina os efeitos de distorção e desbalanço nas partes oscilatórias e médias, para melhorar as análises da teoria PQ, um PLL pode ser empregado. Apesar das diferenças, ambas as teorias podem ser usadas para análise de potência de circuitos e compensação de componentes não ativos. No entanto, a escolha deve ser mais rigorosa em cenários com assimetrias na fonte e/ou carga, as diferenças podem ser bastante significativas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido através da bolsa UTFPR-PIBIC (PROJETO #01759) e pelo CIPECA/DAELE pela estrutura laboratorial.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- Akagi, H.; Ogasawara, S.; Kim, H. "The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems: a comprehensive approach". **IEEE Industry Applications Conference**. 1999. p. 431-439.
- Akagi, H.; Watanabe, E. H.; and Aredes, M. "Instantaneous power theory and applications to power conditioning". John Wiley & Sons, 2017.
- Aredes, M.; Akagi, H.; Watanabe, E. H.; Salgado, E. V.; and L. Encarnação, L. F. "Comparisons Between the p--q and p--q--r Theories in Three-Phase Four-Wire Systems". **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 24, no. 4, 2009.
- Bajaj, M, Singh, AK. Grid integrated renewable DG systems: A review of power quality challenges and state-of-the-art mitigation techniques. **Int J Energy Res**. 2020; 44: 26–69.
- Souza, W.A.; Marafao, F.P.; Liberado, E.V; Simoes, M.G.; and Silva, L.C.P. "A nilm dataset for cognitive meters based on conservative power theory and pattern recognition techniques". **Journal of C.A.E Systems**, v.29, p.742-755, 2018.
- Watanabe, E. H.; Stephan, R. M.; Aredes, M. "New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads". **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 2, p. 697-703, 1993.