

# CARACTERIZAÇÃO DE CARGAS LINEARES E NÃO LINEARES EM CONDIÇÕES DE TENSÕES NÃO SENOIDAIS

Helmo K. Morales Paredes<sup>1</sup>, Paulo H. Ferreira dos Reis<sup>1</sup>, Sigmar M. Deckmann<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia Sorocaba – SP, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), FEEC, Campinas – SP, Brasil

e-mail: hmorales@sorocaba.unesp.br, paulohenriquereis@gmail.com, sigmar@fee.unicamp.br

**Resumo** – Este trabalho apresenta uma análise de cargas lineares e não lineares em condições senoidais e não senoidais para verificar seu comportamento como “fonte de tensão” ou “fonte de corrente” distorciva. Discute ainda problemas relacionados com a medição e tarifação da energia no ponto de acoplamento comum. Para tanto é utilizada a Teoria de Potência Conservativa para encontrar circuitos equivalentes e a partir destes circuitos analisar as principais características das cargas lineares e/ou não lineares bem com o tipo de não linearidades presentes. As análises são comprovadas com base em simulações e dados experimentais de cargas típicas de uso residencial e industrial. Além disso, será discutida a adequação do fator de potência como indicador apropriado para caracterizar e penalizar o consumidor (carga) quando também é produtor (gerador), situação comumente encontrada em microrredes.

**Palavras-Chave** – Carga Não Linear, Fator de Potência, Geração Distribuída, Harmônicas, Modelagem de Carga, Tarifação de Energia.

## LINEAR AND NONLINEAR LOAD CHARACTERIZATION UNDER NON SINUSOIDAL CONDITIONS

**Abstract** – This paper presents an analysis of linear and non-linear loads under sinusoidal and non-sinusoidal operation to verify their behavior as harmonic “voltage source” or “current source”. Harmonic related problems involving the revenue metering at point of common coupling are also discussed. Conservative Power Theory is used to build equivalent circuits, used to analyze the main features of those loads, as well as the type of nonlinearities present. Simulation and laboratory tests are realized in order to support the theoretical conclusions. Moreover, it is shown that the power factor may not be a confident indicator for load characterization in the case a consumer is also an energy producer (generator), as commonly occurs in smart microgrids.

**Keywords** – Distributed Generation, Harmonics, Load Modeling, Nonlinear Load, Power Factor, Revenue Metering.

## I. INTRODUÇÃO

A defasagem entre as correntes demandadas pelas cargas e as tensões de alimentação é considerado um fenômeno indesejado, uma vez que gera um fluxo de potência oscilatório entre a fonte e a carga, sem que tenha sido convertida em potência útil. Porém essa potência oscilatória ou reativa, é frequentemente necessária para excitar os campos magnéticos (efeito indutivo) ou elétricos (efeito capacitivo) da rede e de determinadas cargas. Com a proliferação dos conversores eletrônicos de potência, amplamente difundidos no mercado industrial e doméstico a rede elétrica passou a apresentar correntes harmônicas que podem resultar em distorções significativas nas tensões. Tais fontes harmônicas (cargas não lineares) estão distribuídas por toda a rede. Embora estas cargas individualmente produzam quantidades insignificantes de correntes harmônicas, o efeito conjugado de um grande número de tais cargas pode ser significativo [1]-[3], podendo criar uma série de perturbações para as concessionárias e para os usuários finais [4].

Para sua melhor representação é importante verificar que as cargas não lineares podem apresentar um comportamento de “fontes harmônicas de tensão” ou “fontes harmônicas de corrente” [5], [6]. No entanto, muitas vezes é difícil identificar ou classificar o tipo de comportamento (como fonte de tensão ou fonte de corrente) da carga que está ligada no ponto de acoplamento comum (PAC), porque depende do que está sendo imposto pela carga e pela tensão no PAC. Certamente isto pode influenciar diretamente na escolha, por exemplo, do tipo de compensador para reduzir os reativos e/ou as harmônicas de corrente, na tarifação de energia elétrica e na atribuição de responsabilidades entre as concessionárias e os usuários sobre a geração de reativos e harmônicas. Isto é particularmente verdadeiro em sistemas elétricos modernos [7], onde a frequência da rede pode variar e as distorções da tensão podem ser significativas. Condições de operação, normalmente encontradas nas microrredes de energia elétrica [8]-[10].

O principal desafio, além de impor a adoção de normas mais rigorosas nas cargas não lineares, é desenvolver técnicas de caracterização e identificação dos parâmetros do tipo de carga, adaptar os conceitos de potência reativa e fator de potência ao novo ambiente de redes e microrredes inteligentes de energia [7]-[10] de tal forma que os algoritmos de medição e instrumentação possam ser concebidos para dar orientações adequadas no que diz respeito às técnicas de compensação, às

Artigo submetido em 17/05/2016. Primeira revisão em 06/07/2016. Aceito para publicação em 16/08/2016 por recomendação do Editor Marcelo Cabral Cavalcanti.

quantidades que devem ser medidas ou monitoradas para efeitos de tarifação, compensação, atribuição de responsabilidades e decisões de engenharia econômica.

Há mais de um século, a análise de circuitos elétricos em corrente alternada, utilizando a teoria de números complexos foi proposta por Steinmetz [11], mas a validade mais ampla dos seus conceitos tem sido contestada desde então [12]. Neste sentido, outras propostas foram formuladas, com destaques para as contribuições de Emanuel [12], Depenbrock [13], Akagi [14], Czarnecki [15] e Tenti et al. [16]. Todas estas propostas têm contribuído para a compreensão sobre a modelagem e análise de cargas lineares e não lineares. No entanto, estas técnicas ainda não estão em uma forma de satisfazer a análise focada no comportamento das cargas. Comparações entre estas teorias tem sido feitas em outros estudos [17]-[19].

Com base na decomposição ortogonal da corrente/potência da Teoria de Potência Conservativa, em [20] e [21], o assunto de caracterização de carga foi discutido num ambiente onde a carga é considerada passiva (apenas consome energia). Neste trabalho, a técnica de caracterização de cargas lineares e não lineares é criticamente discutida em detalhe e expandida para o caso em que a carga pode ser um autoprodutor (consome e gera energia). Será mostrado que qualquer tipo de carga linear ou não, em condição de tensão senoidal ou não, pode ser representada por um circuito equivalente composto por associações (série – paralelo) de condutâncias, susceptâncias e uma fonte de corrente distorciva ou uma fonte de tensão distorciva. Também será analisado e discutido o fluxo da energia harmônica entre a fonte e a carga, assim como, a definição do fator de potência como um índice de mérito para penalizar os consumidores em ambientes de microrredes de energia, onde as cargas também possuem unidades de geração local.

## II. MODELAGEM EQUIVALENTE DE CARGAS LINEARES E NÃO-LINEARES

A modelagem equivalente de uma carga genérica passa pela análise do seu comportamento em condições genéricas de operação (tensões e correntes não senoidais), e para tanto será utilizada a Teoria de Potência Conservativa do inglês *Conservative Power Theory* (CPT), proposta em [16], [22]. Uma das principais quantidades definidas pelos autores da CPT é a integral sem valor médio da tensão, que pode ser entendida como a integral da tensão ( $v_f$ ) menos o valor médio da integral dessa tensão ( $\bar{v}_f$ ). Ou seja:

$$\hat{v} = v_f - \bar{v}_f = \int_0^t v(\tau) d\tau - \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \int_0^t v(\tau) d\tau \right] dt. \quad (1)$$

O valor eficaz (norma Euclidiana) de  $\hat{v}$  pode ser escrito como:

<sup>1</sup> A energia reativa, apenas para o caso de condição senoidal pode ser associado com a potência reativa convencional mediante a expressão:

$$W_r = \frac{Q}{\omega} = \frac{1}{\omega} V_1 I_1 \sin \phi,$$

tal que  $\phi$  é a diferença angular entre a tensão e a corrente, e  $\omega$  é a frequência angular fundamental. Já a potência ativa para condição senoidal resulta:

$$P = V_1 I_1 \cos \phi.$$

$$\hat{v} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \hat{v}_k^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{V_k^2}{\omega^2 k^2}} \quad (2)$$

onde  $\omega$  é a frequência angular fundamental e  $k$  indica a ordem harmônica.

Utilizando a definição de distorção harmônica total (DHT) pode-se definir a relação entre os valores eficazes da tensão e a integral sem valor médio da tensão, como sendo:

$$\frac{V}{\hat{v}} = \omega \sqrt{\frac{1 + DHT_v^2}{1 + DHT_{\hat{v}}^2}} \quad (3)$$

onde  $DHT_v = \sum_{h=2}^{\infty} V_h / V_1$  é a distorção harmônica total da tensão e  $DHT_{\hat{v}} = \sum_{h=2}^{\infty} \hat{V}_h / \hat{V}_1$  é o fator de distorção harmônica total ponderado da tensão.

Portanto, podemos definir o *fator de distorção da tensão* como sendo:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1 + DHT_v^2}{1 + DHT_{\hat{v}}^2}} - 1. \quad (4)$$

Finalmente de (3) e (4) temos:

$$\frac{V}{\hat{v}} = \omega(1 + \sigma_v). \quad (5)$$

Uma vez que  $DHT_v^2 \geq DHT_{\hat{v}}^2$ , o fator de distorção da tensão resulta sempre maior ou igual a zero ( $\sigma_v \geq 0$ ). Além disso, se  $\sigma_v = 0$  os valores eficazes da tensão e sua integral imparcial podem ser associados mediante a frequência angular ( $V = \omega \hat{v}$ ).

Outras quantidades (denominadas conservativas) importantes definidas pelos autores da CPT são:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v i dt \quad (6)$$

$$W_r = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{v} i dt \quad (7)$$

onde  $P$  é a potência ativa [Watt] e  $W_r$  a energia reativa [J]<sup>1</sup>.

### A. Decomposição da Corrente Instantânea

Com base nas definições anteriores, a corrente medida no PAC num sistema monofásico qualquer, pode ser decomposta em:

$$i = i_a + i_r + i_v \quad (8)$$

onde  $i_a$  é a corrente ativa,  $i_r$  é a corrente reativa e  $i_v$  é a corrente residual.

A *corrente ativa* é determinada como sendo a corrente mínima necessária para transmitir a potência ativa ( $P$ ) absorvida no PAC e é dada por:

$$i_a = \frac{P}{V^2} v = G_e v \quad (9)$$

tal que  $V$  é o valor eficaz da tensão e o parâmetro  $G_e$  é a condutância equivalente, medida em Siemens [S]. Portanto  $G_e$  é o inverso da resistência equivalente  $R_e$  [ $\Omega$ ].

Da mesma forma, a *corrente reativa* é determinada como sendo a corrente mínima necessária para transmitir energia reativa ( $W_r$ ) no PAC e é dada por:

$$i_r = \frac{W_r}{\hat{V}^2} \hat{v} = \Gamma_e \hat{v} \quad (10)$$

tal que,  $\Gamma_e$  é a reatidade equivalente<sup>2</sup>. Se  $W_r$  for positiva, o comportamento do circuito é indutivo e  $\Gamma_e$  representa o inverso da indutância equivalente do circuito ( $\Gamma_e = 1/L_e$ ). Se em vez disso  $W_r$  é negativo, o comportamento do circuito é capacitivo, e a capacitância equivalente ( $C_e$ ), medida em Farad [F] resulta:

$$C_e = \frac{-W_r}{V^2}. \quad (11)$$

Finalmente a *corrente residual* (distorciva) é aquela que não transfere energia ativa nem reativa e é dada por:

$$i_v = i - i_a - i_r. \quad (12)$$

Por definição, todas as componentes de corrente anteriormente definidas são ortogonais entre si. Portanto a corrente total no PAC resulta:

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 + I_v^2. \quad (13)$$

Diferentemente de  $I_a$ , as outras parcelas de corrente caracterizam um aspecto não ideal do desempenho da carga. De acordo com a decomposição de corrente acima, qualquer carga genérica pode ser representada pela Figura 1. Observa-se que, dependendo da configuração do circuito, as cargas podem apresentar comportamento tipo fonte de corrente distorciva ou tipo fonte de tensão distorciva.

- Se  $W_r$  é positiva, ela pode ser descrita por meio de uma associação paralela de uma condutância equivalente ( $G_e$ ), uma fonte de corrente controlada, que depende do comportamento da corrente no indutor equivalente  $L_e$  (relacionado com a integral da tensão), e um gerador de corrente ( $j_e$ ) que representa o conteúdo harmônico da corrente, conforme Figura 1a. Nota-se que, a fonte de corrente distorciva representa o conteúdo harmônico de corrente que advém da conversão de

energia realizada na carga (de fundamental para outras frequências).

- Se  $W_r$  é negativa, a carga pode ser descrita por meio de uma resistência equivalente, uma fonte de tensão controlada, que depende do comportamento da tensão no capacitor equivalente  $C_e$  (relacionado com a integral da corrente) e uma fonte de tensão distorciva ( $e_e$ ) que representa as tensões harmônicas geradas através da conversão de energia realizada na carga. Neste caso a associação dos elementos é em série, conforme Figura 1b.

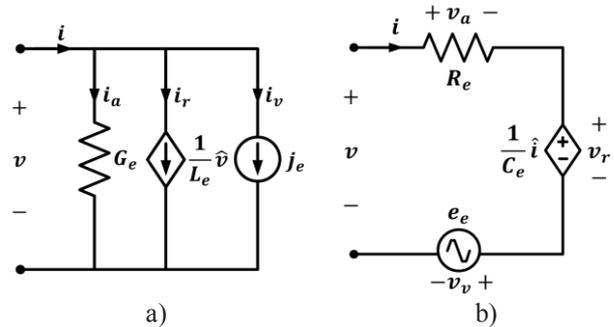


Fig. 1. Circuitos equivalentes de cargas. (a)  $W_r > 0$  decomposição corrente. (b)  $W_r < 0$  decomposição tensão.

#### B. Decomposição da Potência Aparente e Fator de Potência

A potência da fonte de alimentação é caracterizada pelo produto dos valores eficazes de tensão e corrente e é capaz de fornecer a denominada potência aparente. Ou seja:

$$VI = A. \quad (14)$$

Esta não é uma grandeza física, mas sim matemática. O termo aparente enfatiza a natureza fictícia desta potência. Não há nenhum fenômeno físico relacionado diretamente com a potência aparente. Além disso, é um termo não conservativo que é relevante apenas para analisar e/ou dimensionar um determinado circuito ou uma rede elétrica.

Assim, de (13) e (14), a potência aparente pode ser decomposta em relação aos vários termos de corrente da seguinte forma:

$$A = V \sqrt{I_a^2 + I_r^2 + I_v^2} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (15)$$

onde:

- $VI_a = P$ , é a potência ativa e resulta idêntica a (6);
- $VI_r = Q = \omega(1 + \sigma_v)W_r$ , é a potência reativa;
- $VI_v = D$ , é a potência residual (distorciva).

Diferente de  $P$ ,  $Q$  e  $D$  são quantidades não conservativas e dependem da frequência. Observa-se que as definições apresentadas anteriormente sugerem uma associação direta do significado físico das correntes ativa, reativa e residual, e os termos definidos constituem uma base consistente para análise e medições sob operação distorcida.

<sup>2</sup> Originalmente os autores da CPT utilizam a letra  $B_e$  como o símbolo para a reatidade equivalente. Neste trabalho é utilizado gama ( $\Gamma_e$ ), para evitar a confusão com o símbolo tradicional da susceptância.

De posse da potência aparente, pode-se, então, generalizar a definição do fator de potência:

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{I_a}{\sqrt{I_a^2 + I_r^2 + I_v^2}}. \quad (16)$$

Assim, a presença dos reativos e das não linearidades da carga (harmônicas de tensão e corrente), influenciam no fator de potência, reduzindo-o.

### III. FATOR DE POTÊNCIA E CIRCUITO EQUIVALENTE

Para caracterizar os diferentes aspectos de operação das cargas (lineares e/ou não lineares) no PAC, com base na decomposição ortogonal da corrente/potência é possível decompor o fator de potência em vários índices (fatores) de conformidade [20]. Tais índices são chamados de “fatores de conformidade de carga” e neste trabalho são baseados nos parâmetros equivalentes da carga (Bipolos). Além disso, os fatores de conformidade podem ser calculados independentemente das formas de onda de tensão e corrente.

Como a corrente reativa é associada ao desfasamento entre a tensão e corrente nas várias frequências presentes, similarmente ao fator de deslocamento ( $\cos \phi$ ) utilizado para a operação senoidal, esta corrente pode ser utilizada para generalizar o efeito de desfasamento para condição não senoidal mediante o *fator de reatividade*, o qual é definido como:

$$\lambda_Q = \frac{I_r}{\sqrt{I_a^2 + I_r^2}} = \frac{\frac{B_e}{1 + \sigma_v}}{\sqrt{G_e^2 + \left(\frac{B_e}{1 + \sigma_v}\right)^2}} \quad (17)$$

tal que,  $B_e = \frac{1}{\omega L_e}$  é a susceptância equivalente do circuito medida em [S]. Observa-se que, independentemente da variação da frequência e da distorção de tensão,  $\lambda_Q$  indica a existência de deslocamento de fases entre os componentes da tensão e da corrente, que pode ser provocada por elementos armazenadores de energia (indutores e capacitores) ou até mesmo por cargas não lineares.

No caso de uma carga com comportamento indutivo, a capacitância necessária do compensador (capacitor) para a compensação total resulta:

$$C_e = \frac{W_r}{V^2} = -\frac{1}{L_e} \frac{\hat{V}^2}{V^2} = \frac{-B_e}{\omega(1 + \sigma_v)^2} \Rightarrow B_{ec} = \frac{-B_e}{(1 + \sigma_v)^2}. \quad (18)$$

Por outro lado, nota-se que, para tensão senoidal e frequência angular constante,  $\lambda_Q$  resulta:

$$\lambda_Q = \frac{\frac{1}{\omega L_1}}{\sqrt{G_1^2 + \left[\frac{1}{\omega L_1}\right]^2}} = \frac{B_1}{\sqrt{G_1^2 + B_1^2}} = \text{sen } \phi \quad (19)$$

tal que o subscrito “1” indica componente fundamental. E o capacitor (na frequência fundamental) para a compensação total resulta:

$$\omega C_1 = -\frac{1}{\omega L_1} \Rightarrow \omega C_1 = B_{C1} = -B_1. \quad (20)$$

Similarmente, como a corrente residual contém todas as parcelas que não geram potência ativa nem energia reativa, esta corrente pode ser utilizada para calcular o índice de distorção, que seria equivalente à distorção harmônica total. Assim, o *fator de distorção* é definido como:

$$\lambda_D = \frac{I_v}{\sqrt{I_a^2 + I_r^2 + I_v^2}} = \frac{J_e}{\sqrt{G_e^2 + \left(\frac{B_e}{1 + \sigma_v}\right)^2 + J_e^2}} \quad (21)$$

tal que,  $J_e = \frac{i_v}{v}$  é um bipolo medido em [S] que representa na carga a conversão de energia da frequência fundamental para outras frequências. Observa-se que  $\lambda_D$  desaparece apenas se a corrente residual é reduzida a zero ( $i_v = 0$ ). Apenas no caso de tensões senoidais  $\lambda_D$  pode ser associado com a tradicional *DHT* de corrente, através da seguinte relação:

$$\lambda_D = \frac{DHT_I}{\sqrt{1 + DHT_I^2}}. \quad (22)$$

Finalmente, considerando (16), (17) e (21) o fator de potência no caso geral pode ser dado por:

$$\lambda = \frac{G_e}{\sqrt{G_e^2 + \left(\frac{B_e}{1 + \sigma_v}\right)^2 + J_e^2}} = \sqrt{(1 - \lambda_Q^2)(1 - \lambda_D^2)}. \quad (23)$$

Observa-se que (23) resulta unitário apenas se a carga for puramente resistiva, independente da tensão de alimentação. Além disso, uma carga resistiva pura pode ter fator de potência unitário, mesmo na presença de tensões não senoidais. A presença de quaisquer outros tipos de cargas não resistivas afeta o fator de potência. Por outro lado, com base em (23), uma carga genérica também poderia ser representada pela associação paralela dos bipolos que compõe a carga conforme Figura 2. Neste caso, por simplicidade, é apresentada apenas a associação paralela (caso indutivo).

Da análise anterior, observa-se que a caracterização de carga mediante o fator de potência poderia ser utilizada no projeto do compensador para melhorar a eficiência da energia transmitida ou para avaliar a qualidade da energia da carga e, portanto, decidir sobre o procedimento que deve ser utilizado para tarifar os consumidores. Além disso, a caracterização de carga leva em conta a forma de utilização da potência reativa. No entanto, a análise em condições de tensão não senoidais não é trivial, tornando-se uma tarefa complexa que não permite uma interpretação fácil sobre a origem dos distúrbios ou sobre quais seriam os valores efetivos dos parâmetros da carga equivalente. Assim na próxima seção será discutido um método de caracterização de carga (i. e. identificar os parâmetros como: condutância, susceptância e a fonte

harmônica que de fato caracteriza o comportamento de uma carga genérica).

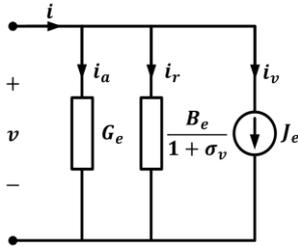


Fig. 2. Circuito equivalente baseado na decomposição do fator de potência.

#### IV. CARACTERIZAÇÃO DE CARGAS LINEARES E NÃO-LINEARES

A idéia central deste método é a de extrair, a partir das formas de onda de tensão e corrente e parcelas de potência medidas no PAC, um modelo de carga equivalente que represente uma carga genérica (caixa preta).

Baseado na decomposição de corrente/potência apresentada no item II, porém pressupondo que a fonte de tensão que alimenta as cargas genéricas é puramente senoidal, e levando em conta o sinal da energia reativa *fundamental*, uma carga genérica pode ser caracterizada mediante a Figura 3.

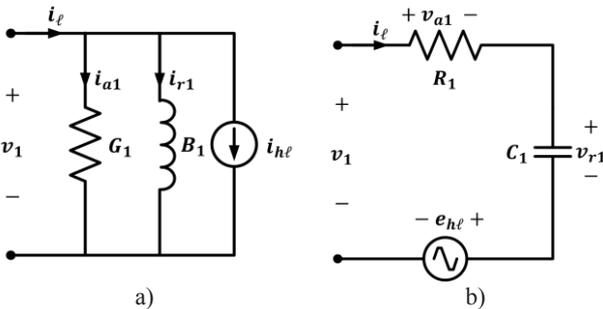


Fig. 3. Circuito equivalente após a caracterização da carga. (a) Fonte de corrente harmônica ( $W_{r1} > 0$ ). (b) Fonte de tensão harmônica ( $W_{r1} < 0$ ).

Observa-se que, diferentemente do circuito equivalente mostrado na Figura 1, este método apresenta uma caracterização mais apropriada para a carga, onde o circuito paralelo é composto por uma condutância fundamental ( $G_1$ ), uma susceptância fundamental ( $B_1$ ) e uma fonte de corrente harmônica ( $i_{h\ell}$ ). Por outro lado, o circuito série é composto por uma resistência fundamental ( $R_1$ ), um capacitor fundamental ( $C_1$ ) e uma fonte de tensão harmônica ( $e_{h\ell}$ ). Neste caso, as fontes de tensão e corrente apontam os harmônicos oriundos da conversão de energia na carga.

Supondo que o equipamento de medição é capaz de decompor a tensão em componente fundamental e harmônicas, a potência ativa fundamental e a energia reativa fundamental, podem ser calculadas por:

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T v_1 i_1 dt \quad (24)$$

$$W_{r1} = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{v}_1 i_1 dt. \quad (25)$$

Agora considerando os circuitos equivalentes da Figura 3, os parâmetros equivalentes para caracterizar uma carga genérica podem ser calculados:

- Condutância fundamental [S]:

$$G_1 = \frac{P_1}{V_1^2}. \quad (26)$$

- Susceptância fundamental [S]:

$$\frac{1}{L_1} = \frac{W_{r1}}{\hat{V}_1^2} = \frac{\omega^2 Q_1}{\omega V_1^2} \Rightarrow \frac{1}{\omega L_1} = B_1 = \frac{Q_1}{V_1^2}. \quad (27)$$

Pode-se afirmar que se  $G_1$  e  $L_1$  forem alimentados pela tensão fundamental ( $v_1$ ), estes devem absorver exatamente a corrente fundamental da carga ( $i_1$ ). Assim:

$$i_1 = G_1 v_1 + \frac{1}{L_1} \hat{v}_1. \quad (28)$$

- Fonte de corrente harmônica [A]:

$$j_{h\ell} = i_\ell - G_1 (v_1 + v_h) - \frac{1}{L_1} (\hat{v}_1 + \hat{v}_h) \quad (29)$$

$$j_{h\ell} = i_\ell - i_1 - G_1 v_h - \frac{1}{L_1} \hat{v}_h = i_h - G_1 v_h - \frac{1}{L_1} \hat{v}_h.$$

O mesmo raciocínio pode ser aplicado para o circuito série:

- Resistência fundamental [ $\Omega$ ]:

$$R_1 = \frac{P_1}{I_1^2}. \quad (30)$$

- Capacitância pela fundamental [F]:

$$C_1 = -\frac{\hat{I}_1^2}{W_{r1}} = -\frac{\omega I_1^2}{\omega^2 Q_1} \Rightarrow C_1 = \frac{I_1^2}{\omega Q_1}. \quad (31)$$

- Fonte de tensão harmônica [V]:

$$e_{h\ell} = v_1 - R_1 i_\ell - \frac{\hat{i}_\ell}{C_1} = v_h - R_1 i_h - \frac{\hat{i}_h}{C_1}. \quad (32)$$

Percebe-se que tanto a fonte de corrente harmônica quanto a fonte de tensão harmônica ficam em função das componentes harmônicas de tensão e corrente, bem como das suas parcelas harmônicas das integrais parciais de tensão e corrente. Com os parâmetros calculados, pode-se descrever o circuito equivalente que caracteriza uma carga genérica. Observa-se que estes circuitos (Figura 3) são mais gerais que aqueles propostos em [5], [6], onde foi introduzido o conceito de carga tipo fonte de tensão e tipo fonte de corrente, mas onde as do tipo fonte de tensão só podiam ser caracterizadas por uma fonte de tensão harmônica, assim como a de corrente apenas por uma fonte de corrente harmônica.

## V. FATOR DE POTÊNCIA E CARACTERIZAÇÃO DE CARGAS EM MICRORREDES DE ENERGIA ELÉTRICA

As microrredes de energia elétrica são compostas por geradores distribuídos (fotovoltaicos, eólicos, microturbinas, etc) e cargas dispersas operando de forma isolada ou cooperativamente com a rede elétrica. Estas unidades de geração, na sua maioria, podem ser ligadas através de uma interface de eletrônica de potência (IEP), e a IEP é responsável pela injeção da energia produzida pela fonte local de energia (FLE) na rede. Assim, quando o consumidor (carga) é também um produtor de eletricidade (gerador), a potência ativa injetada ( $P_{FLE}$ ) gerada modifica o valor da potência ativa no lado da rede:

$$P_G = P - P_{FLE} \quad (33)$$

onde  $P$  é a potência ativa demandada pela carga. Logo, o fator de potência no lado da rede também é modificado:

$$\lambda_G = \frac{P_G}{\sqrt{P_G^2 + P_{na}^2}} = \frac{P - P_{FLE}}{\sqrt{(P - P_{FLE})^2 + P_{na}^2}} \quad (34)$$

tal que  $P_{na} = \sqrt{Q^2 + D^2}$  é potência não ativa demandada pela carga. Nota-se que o fator de potência depende da produção de energia da fonte local ( $P_{FLE}$ ) e da demanda de  $P$ ,  $Q$  e  $D$  da carga. De (34), observa-se que o fator de potência pode variar em função da energia produzida pela FLE. Estas condições de operação são muito comuns em unidades de geração com características intermitentes como são a fotovoltaica e eólica. Portanto nestes sistemas podemos ter as seguintes situações:

- Se a FLE não produz energia ( $P_{FLE} = 0$ ), o fator de potência do lado da rede resulta igual ao da carga ( $\lambda_G = \lambda$ ). A carga pode ser caracterizada conforme a definição do fator de potência;
- Se a potência gerada pela FLE é igual a potência demandada pela carga ( $P_{FLE} = P$ ), o fator de potência resulta nulo ( $\lambda_G = 0$ ). Neste caso não é possível caracterizar a carga, mediante a definição do fator de potência;
- Se a potência gerada é maior que a potência demandada pela carga ( $P_{FLE} > P$ ) o fator de potência resulta (-) e pode ser menor que sem FLE ( $\lambda_G < \lambda$ ). Neste caso, por exemplo, um autoprodutor que injeta potência ativa na rede estaria sendo penalizado ainda mais pela diminuição do fator de potência. Assim a caracterização de carga mediante o fator de potência pode não ser a mais adequada;
- Se a potência gerada é menor que a potência demanda pela carga ( $P_{FLE} < P$ ) o fator de potência resulta (+) e também pode resultar mais baixo que sem FEL ( $\lambda_G < \lambda$ ). Portanto, também neste caso a caracterização da carga mediante o fator de potência pode não ser a mais adequada.

Do anterior, quando a potência ativa é negativa, o fator de potência por definição é negativo. Quando a potência ativa é positiva, por definição o fator de potência resulta positivo. Embora a norma IEEE 1459 [23] não se refira explicitamente

ao fator de potência negativo, é uma consequência inevitável das equações de fator de potência da própria norma. Além disso, observa-se que o fator de potência, quando o consumidor é também um produtor pode não ser a mais adequada para projetar o compensador ou para avaliar a qualidade da energia das cargas, e, portanto, pode influenciar nas decisões sobre a tarifação da energia elétrica. Com efeito, a quantidade de energia entregue custa mais para o fornecedor local, se o fator de potência é baixo. Por estas razões, os limites do fator de potência devem ser revistos, ou até mesmo abolidos, como um fator de mérito nas microrredes de energia (geração distribuída).

Por outro lado, se formos utilizar a caracterização de carga mediante a decomposição de corrente da CPT, o circuito equivalente resultaria igual ao da Figura 4.

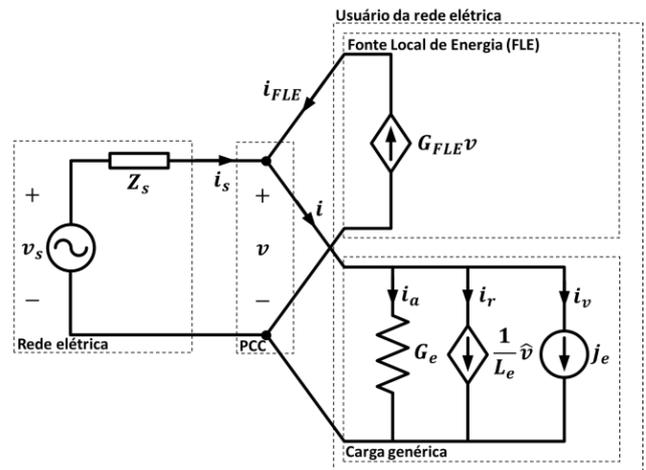


Fig. 4. Circuito equivalente baseado na decomposição de corrente da CPT considerando geração de energia local.

Neste caso, a injeção de potência ativa ( $P_{FLE}$ ) gerada pela FLE é realizada pela corrente  $i_{FLE}$  a qual é obtida do produto da condutância equivalente ( $G_{FLE} = P_{FLE}/V^2$ ) multiplicado pela tensão. Da Figura 4, a corrente no lado da rede resulta:

$$i_s = i - i_{FLE} = i_a - i_r - i_v - i_{FLE}. \quad (35)$$

Uma vez que a corrente que está sendo injetada na rede ( $i_{FLE}$ ) deve ser senoidal e em fase com a tensão, a corrente reativa e residual drenada pela carga é fornecida pela rede, diminuindo assim o fator de potência da unidade consumidora. No entanto, neste caso o problema para a rede não é o valor do fator de potência, mas sim as correntes indesejadas (reativa e distorciva) que circulam através da impedância de linha incrementando as perdas na linha. Assim, num cenário onde o consumidor também é um produtor de energia, não faz sentido limitar o fator de potência, uma vez que a diminuição do fator de potência é devido à injeção da corrente ativa (potência ativa) que está sendo gerada pela FLE. Neste caso, deveriam ser limitadas as correntes indesejadas (reativa e distorciva) como vem sendo realizadas em [24]-[26], ou utilizando outras técnicas de controle multifuncional de conversores eletrônicos. Discussões adicionais sobre outros indicadores de qualidade da energia elétrica podem ser encontrados em [27].

## VI. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Como discutido em [28], as cargas tipo “fonte de corrente” são representadas por aparelhos domésticos que contenham motores ou transformadores em sua entrada, como por exemplo, refrigeradores, máquinas de lavar, aparelho de ar-condicionado e ventiladores. Tais cargas têm como característica uma alta demanda de potência reativa e a distorção da corrente, o que causa a defasagem entre a tensão e a corrente e a produção de harmônicas. Já as cargas tipo “fonte de tensão” são representadas por aparelhos domésticos eletrônicos que contenham estágios retificadores (a diodos ou a tiristores), com um filtro capacitivo na saída, o que origina uma corrente de entrada distorcida e com fator de potência baixo. Alguns exemplos que podem ser citados: carregadores de bateria de celular e de notebook, televisão, micro-ondas, etc. Neste sentido, nas próximas seções serão discutidos resultados de simulações e dados experimentais de laboratório de cargas com as características acima expostas (“fonte de tensão” e “fonte de corrente” harmônicas).

### A. Análise de Resultados de Simulação

De modo a verificar os conceitos apresentados e exemplificar algumas das mais representativas situações retratadas nos itens anteriores, foram simulados em software PSIM um conjunto de quatro cargas (Figura 5) com diferentes configurações e condições de operação. Visando uma aplicação prática da CPT todos os algoritmos e sub-rotinas (equações) foram implementadas (utilizando uma frequência de amostragem de 12 kHz) em C++ e compiladas em DLLs (*Dinamic Link Library*) para serem acessadas através do Softwar PSIM.

**Exemplo # 1:** Considere a carga não linear que varia no tempo da Figura 5a. O Triac (ângulo de disparo,  $\alpha = 120^\circ$ ) controla uma carga puramente resistiva ( $R = 2 \Omega$ ), alimentada por uma fonte de tensão senoidal,  $v = 127\sqrt{2}\text{sen}(\omega_1 t)$  V, com  $\omega_1 = 377$  rad/s. O objetivo principal deste caso é discutir o conceito da energia reativa. É importante salientar que a carga, quando o capacitor está desligado, não apresenta elementos armazenadores de energia.

A Figura 6a indica as formas de onda resultantes da CPT. Como se pode notar, a corrente drenada pela carga é de característica não senoidal (não linear). Entretanto, aplicando a separação da corrente total da carga, verifica-se que a corrente fundamental ( $i_1$ ) está atrasada da tensão ( $v$ ).

Olhando para as correntes decompostas da CPT pode-se verificar a presença de todas as parcelas de corrente, ou seja, ativa, reativa e residual. Além de demonstrar o consumo útil através do resistor e corrente residual pela não linearidade

introduzida pelo Triac, a CPT revela que o circuito apresenta corrente reativa (energia reativa, indutiva), característica essa que não é óbvia. Um questionamento que se pode levantar parte da natureza da carga: afinal deveria essa carga apresentar energia reativa, uma vez que não há componentes armazenadores de energia? Essa questão nos remete diretamente à definição da energia reativa e, por conseguinte, da potência reativa.

Classicamente (sistema senoidal), os reativos eram associados à presença de elementos armazenadores de energia, com característica intrínseca de atrasarem (indutivo) ou adiantarem (capacitivo) a corrente em relação à tensão. Isso é um fenômeno inerente à natureza desses elementos. Já em uma carga não linear, como discutido, embora não apresente elementos armazenadores de energia, resulta absorção de energia reativa indutiva, associada à forma recortada da corrente no início de cada meio ciclo. Se o recorte imposto pelo triac ocorresse no final da cada meio ciclo, resultaria um comportamento de carga capacitiva, pois a fundamental da corrente estaria adiantada em relação à tensão.

A simples assimetria da corrente em relação ao pico da tensão fundamental é suficiente para caracterizar o deslocamento de fase da corrente fundamental. Com isso a energia reativa associada com a carga não linear se apresenta como “indutiva” quando é absorvida atrasada em relação à referência de tensão ou “capacitiva” quando é absorvida adiantada em relação a essa mesma referência. Conclui-se que é necessário reavaliar o conceito de que energia reativa seja eminentemente uma energia oscilatória entre um elemento armazenador (indutor ou capacitor) e a rede. No caso dessa carga não linear ela representa a parcela de energia fundamental que é demandada para satisfazer as condições da não-linearidade.

Outro fato interessante de se verificar é se a energia/potência reativa com característica indutiva ( $W_r > 0$ ) gerada a partir dessa carga resistiva não linear pode ser compensada por um capacitor – outra informação não intuitiva. Assim, a partir da energia reativa, foi calculado o capacitor para compensar os reativos na frequência fundamental. De (11), o valor do capacitor resultou igual a  $312,7 \mu\text{F}$ . Portanto, a partir das definições da CPT, o circuito da Figura 5a pode ser representado por um circuito equivalente em paralelo ( $W_r > 0$ ) contendo uma condutância  $G_e$ , e uma susceptância  $B_e$ , bem como uma fonte de corrente harmônica  $j_e$ . Os parâmetros equivalentes da carga antes e depois da introdução do capacitor são apresentados na Tabela I e Figura 7a.

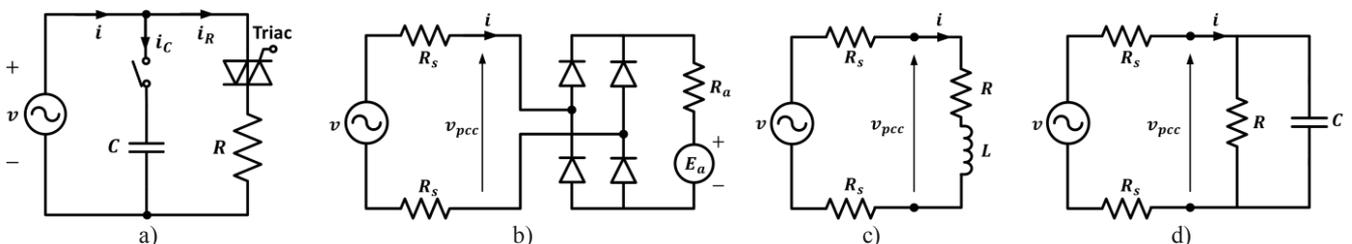


Fig. 5. Circuitos analisados: a) Exemplo # 1, carga resistiva controlada por Triac, b) Exemplo # 2, motor CC alimentado por uma fonte de tensão CA, c) Exemplo # 3, carga RL, resistiva indutiva, d) Exemplo # 4, carga RC, resistiva capacitiva.

**TABELA I**  
**Grandezas da CPT no PAC – Circuito do Exemplo # 1**

A [VA]	P [W]	Q [Var]	D [VA]	W <sub>r</sub> [J]	
3514,991	1532,054	1899,209	2530,015	5,0437	Sem C
2957,425	1531,978	0,0000	2529,704	0,0010	Com C

Da Figura 7a, no tempo igual a 1s quando o capacitor é conectado, verifica-se que o capacitor compensa apenas os reativos, uma vez que a condutância equivalente ( $G_e$ ) e a corrente harmônica da carga ( $j_e = i_v$ ) não são modificadas com sua introdução. Assim a carga pode ser caracterizada como sendo uma de tipo “fonte de corrente harmônica”. Os valores dos bipolos equivalentes da carga resultam:  $G_e = P/V^2 = 0,9499$  S,  $B_e = \omega W_r/V^2 = 0,1179$  S (antes da compensação) e  $J_e = D/V^2 = 0,1569$  S. Como a tensão é senoidal, esses valores resultam idênticos aos valores fundamentais do circuito da Figura 3a. Ou seja,  $G_e = G_1$ ,  $B_e = B_1$  (antes da compensação) e  $j_e = i_{h\ell}$ .

Nesse mesmo contexto, da Tabela I, observa-se que com a introdução do capacitor, a potência reativa, bem como a energia reativa são compensadas. Portanto, da potência aparente restam apenas a potência ativa e residual, que com a inserção do capacitor não se alteram, corroborando o fato de que as parcelas de corrente são ortogonais. Dessa forma, a energia/potência reativa não relaciona somente a troca de energia entre a fonte e os elementos armazenadores de energia, mas tem um significado mais abrangente, ou seja, independe do que o promova (seja por campos eletromagnéticos presentes em indutores e capacitores, seja por controle de disparo de chaves eletrônicas), a energia/potência reativa está associada com a defasagem entre tensão e corrente em cada frequência.

Cabe destacar que a definição da energia reativa foi reivindicada para estudar e analisar circuitos elétricos independentemente da variação de frequência (por exemplo, microrrede de energia elétrica), embora a sua definição tenha sido desafiada recentemente em [29]. No entanto, neste trabalho foi mostrado que a caracterização de carga mediante a Figura 2 que utiliza a definição de potência reativa, permite obter as mesmas conclusões apontadas em [30], onde o circuito da Figura 5a também foi analisado.

**Exemplo # 2:** A Figura 5b mostra um motor CC alimentado por um conversor CA/CC com fonte de tensão senoidal (idêntica ao Exemplo #1). Assumindo que o retificador é ideal (sem perdas), a indutância de armadura é negligenciável (as perdas são puramente resistivas,  $R_a = 0,2 \Omega$ ),  $E_a = 127$  V e a fonte de tensão alimenta a carga mediante uma impedância de linha puramente resistiva ( $R_s = 0,4 \Omega$ ). O objetivo principal desta carga é discutir o fluxo da potência ativa e seu uso para fins de tarifação.

A Figura 6b mostra as formas de onda da tensão e corrente no PAC, bem como as componentes da corrente decompostas mediante a CPT. Verifica-se que a forma de onda da corrente fundamental está em fase com a tensão. Assim, por não haver defasagem entre tensão e corrente, conforme discutido anteriormente, a energia/potência reativa é nula. Esta afirmação pode ser confirmada olhando para as correntes decompostas, e de fato nota-se que não há circulação de corrente reativa. Observa-se, portanto, apenas as correntes ativa e residual. Por outro lado, devido ao impacto da carga

sobre a impedância de linha, a tensão no PAC é não senoidal e pode-se aplicar a caracterização da carga através da metodologia apresentada anteriormente. De fato, o  $THD_I$  é 60,43 % o que promoveu um  $THD_V$  de 10,27 %. Assim, essa carga pode ser caracterizada como uma carga tipo fonte de corrente harmônica. Ou seja, por uma associação paralela de uma condutância fundamental ( $G_1 = 21259$  S), uma susceptância fundamental ( $B_1 = 0$  S) e uma fonte de corrente harmônica ( $j_{h\ell}$ ). Os parâmetros da carga são apresentados nas Figura 7b. A Tabela II apresenta todos os termos de potência e fatores de conformidade da CPT. Nota-se que a carga realmente não apresenta circulação de reativos, sendo assim ela pode ser caracterizada apenas pela condutância fundamental e pela fonte de corrente harmônica.

**TABELA II**  
**Grandezas da CPT no PAC – Circuito do Exemplo # 2**

A [VA]	P [W]	Q [Var]	D [VA]	W <sub>r</sub> [J]	P <sub>1</sub> [W]
2941,180	2348,981	0,000	1771,018	0,000	2504,537
	$\lambda$	$\lambda_Q$	$\lambda_D$		
	0,799	0,000	0,602		

Um aspecto importante dentro da caracterização de carga, é identificar qual ou quais parcelas deveriam ser tarifadas. Usualmente, a integral da potência ativa num período de um mês é tarifada. Não entanto é sabido que essa grandeza, quando presente, inclui uma parcela de potência ativa harmônica. E surge então a dúvida se esta parcela também deveria ser incluída na conta de energia.

Para encontrar uma outra grandeza que poderia ser implementada para fins de tarifação, é interessante analisar o fluxo da potência ativa. No caso geral a potência ativa definida em (6), no domínio da frequência pode ser reescrita por:

$$P = P_1 + \sum_{h=2}^{\infty} P_h = P_1 + P_H \quad (36)$$

onde os índices 1 e  $h$  representam a frequência fundamental e as harmônicas respectivamente. Por outro lado, da equação anterior e da Tabela II, a potência harmônica ( $P_H$ ) resulta:

$$P_H = P - P_1 = V_H I_H = 2348,981 - 2504,537 = -155,556 \text{ W}$$

observa-se que a potência ativa harmônica resultou negativa. Isso significa que o fluxo de energia harmônica (potência ativa harmônica gerada pela carga) retorna da carga para a fonte, e esta energia é dissipada sobre a impedância da linha ( $P_H = -R_s I_H^2$ ) incrementando as perdas. Como a fonte de tensão é senoidal, essa potência é fornecida à carga através da componente fundamental e por isso a potência ativa fundamental é maior que a potência ativa ( $P_1 > P$ ). Assim pode-se dizer que  $P_1$  supre a potência útil  $P$  da carga e as perdas associadas às harmônicas  $P_H$ .

Esta análise é muito interessante para, por exemplo, tarifação da energia elétrica. Desde que  $P_1$  é a potência necessária para que o equipamento que gera as harmônicas (carga) funcione, o usuário deve ser tarifado pela energia associada à potência necessária para o seu funcionamento, ou seja:

$$kWh = \int_0^{m\acute{e}s} P_1 dt. \quad (37)$$

A equação anterior fornece não só os dados da energia entregue ao consumidor, mas também a energia adicional dissipada no sistema de distribuição pela carga não linear (carga geradora de correntes harmônicas). Tal método de faturação foi sugerida pelos autores deste trabalho em [31].

Neste caso, a potência ativa fundamental apresenta uma interpretação clara (transferência de potência para a carga, incluindo a parcela devolvida para a rede como perdas harmônicas de transmissão). Finalmente, a potência aparente  $A$  é incrementada pela potência residual,  $D$  (representando a potência distorciva associada com as componentes harmônicas da corrente) que por sua vez diminui o fator de potência.

Utilizando  $P_H$  e  $P_1$ , pode ser definido um novo índice denominado fator de não conformidade da potência ativa como sendo:

$$\lambda_p = \frac{P_H}{P_1} = \lambda \frac{A}{P_1} - 1. \quad (38)$$

O fator  $\lambda_p$  mostra o quanto de potência indesejada que gera efeitos nocivos, está contido na potência ativa. Este fator é devido principalmente à tensão não senoidal. Observe que  $\lambda_p$  é nulo quando  $P_1 = P$ , ou seja, quando a tensão é senoidal. Neste caso, a tensão não senoidal no PAC originada pela carga, provocou 6,21 % de perdas adicionais na linha. Por outro lado, considerando o sentido da potência ativa harmônica,  $\lambda_p$  resulta menor que zero ( $\lambda_p = -0,0621$ ).

**Exemplo # 3:** A Figura 5c mostra o circuito analisado. A tensão de alimentação é não senoidal composta pela mesma tensão do Exemplo #1 mais 10% da 3ª e 5ª harmônica. Através de uma impedância de linha ( $R_s = 0,4 \Omega$ ) a fonte alimenta uma carga resistiva indutiva (RL) que representa um motor de indução de 3000 W com  $\cos\phi = 0,8$  ( $R = 3,441 \Omega$  e  $L = 6,845$  mH). Similarmente, o objetivo desta carga é discutir o fluxo da potência ativa e seu uso para fins de tarifação.

A Figura 6c mostra as formas de onda da tensão, corrente e da decomposição da corrente no PAC. Observa-se que neste caso, além da corrente ativa e reativa, há também a corrente residual, causada pela não linearidade entre as formas de onda da tensão (fonte) e a característica indutiva da carga (corrente da carga). Além disso, observa-se que a corrente reativa é ligeiramente distorcida, uma vez que seu cálculo é baseado em uma função integral. Neste caso a fonte de alimentação apresenta um  $THD_V$  de 15,86 % o que promoveu um  $THD_I$  de 6,708 %.

A Tabela III mostra os valores de cada parcela de potência relacionada às componentes de corrente já discutidas anteriormente. Observa-se que a energia reativa é positiva, isto é, devido ao comportamento indutivo da carga. É interessante observar que a não linearidade entre as formas de onda de tensão e corrente ocasiona a presença de potência residual. Também vale destacar que tanto  $P$  e  $Q$ , incluem as contribuições das componentes harmônicas.

TABELA III

Grandezas da CPT no PAC – Circuito do Exemplo # 3

A [VA]	P [W]	Q [Var]	D [VA]	$W_r$ [J]	$P_1$ [W]
2856,440	2262,096	1715,995	312,298	4,481	2251,391
	$\lambda$	$\lambda_Q$	$\lambda_D$	$\lambda_p$	
	0,7919	0,6044	0,1093	0,005	

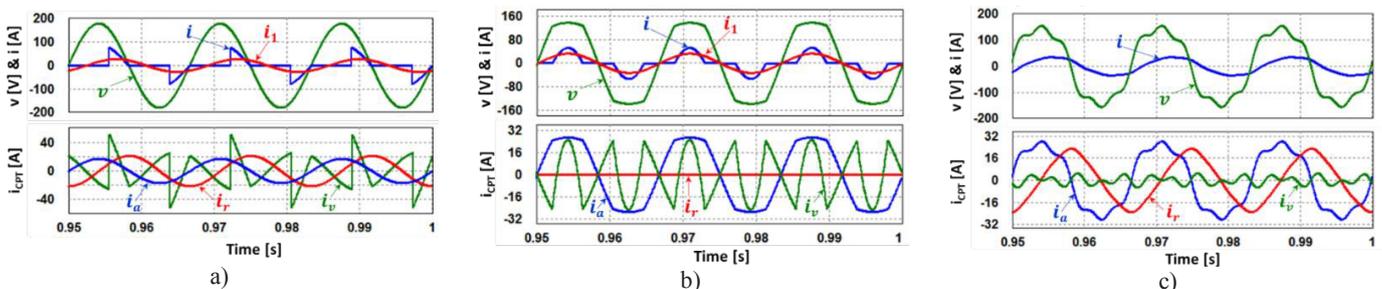


Fig. 6. Tensão, corrente e decomposição da corrente no PAC, de acordo com a CPT para os circuitos analisados: a) Exemplo # 1, carga resistiva controlada por Triac, b) Exemplo # 2, motor CC alimentado por uma fonte de tensão CA, c) Exemplo # 3, carga RL, resistiva indutiva.

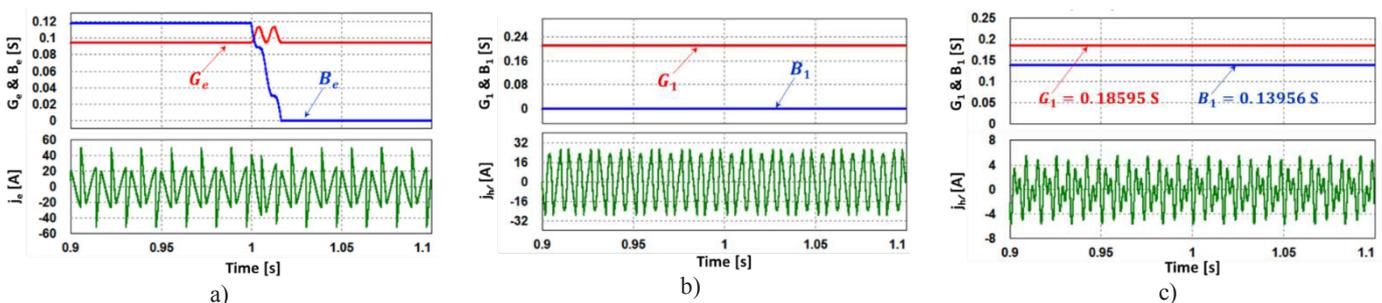


Fig. 7. Parâmetros estimados para os circuitos analisados: a) Exemplo # 1, característica tipo fonte de corrente harmônica, b) Exemplo # 2, característica tipo fonte de corrente harmônica, c) Exemplo # 3, característica tipo fonte de corrente harmônica.

Neste caso, de (36) e da Tabela III, a potência harmônica,  $P_H$  resulta:  $P_H = 2262,440 - 2251,391 = 11,049 \text{ W}$ . Diferente da carga anterior (Exemplo # 2), a potência ativa harmônica resulta positiva, indicando que, o fluxo de energia harmônica (gerada pela fonte) é absorvida pelo campo magnético do indutor e é transformado em outras frequências harmônicas e essa parcela é devolvida para a fonte, incrementando as perdas na linha. Neste caso, como a fonte de tensão é não senoidal, a potência ativa fundamental é menor que a potência ativa ( $P_1 < P$ ). Assim pode-se dizer que o trabalho útil produzido por  $P_1$  é menor que a potência ativa total suprida  $P$  devido às perdas harmônicas no alimentador  $P_H$ . Neste caso a energia harmônica fornecida pela fonte também origina a potência residual, que não produz trabalho útil. A tensão não senoidal fornecida pela fonte provocou 0,5 % de perdas adicionais na linha.  $\lambda_p$  resultou ligeiramente maior que zero ( $\lambda_p = 0,005$ ) sugerindo que o fluxo harmônico vem da fonte para a carga. Como a fonte de tensão está fornecendo  $P_H$  para a carga, o usuário deverá ser tarifado apenas pela energia associada à potência necessária para o seu funcionamento (potência útil), ou seja, novamente taxado pela energia ativa fundamental (37).

Finalmente, dos exemplos 2 e 3, observou-se que a potência ativa harmônica pode ser positiva ou negativa, simbolizando que o fluxo de potência ativa harmônica ora é da fonte para a carga (+), ora da carga para a fonte (-). Por esse fato revelou-se que a potência ativa total poderia ser menor ou maior que a potência ativa fundamental. Portanto, a definição da potência ativa no domínio da frequência pode ser generalizada para:

$$P = P_1 \pm \sum_{h=2}^{\infty} P_h = P_1 \pm P_H. \quad (39)$$

Além disso, observou-se que o fator de não conformidade da potência ativa,  $\lambda_p$ , resulta maior que zero (+) quando o fluxo de potência ativa harmônicas é originado pela fonte de alimentação e resulta menor que zero (-) quando o fluxo de potência ativa harmônica é originado pela carga.

Similarmente, a energia reativa no domínio da frequência poderia ser generalizada para:

$$W_r = W_{r1} \pm \sum_{h=2}^{\infty} W_{rh} = W_{r1} \pm W_{rH}. \quad (40)$$

Finalmente, de acordo com o valor da energia reativa ( $W_r > 0$ ), esta carga pode ser caracterizada como uma carga tipo fonte de corrente harmônica. A Figura 7c apresenta os valores estimados dos parâmetros da carga. Verifica-se, através dos parâmetros obtidos, que  $G_1$  e  $B_1$  (resistor em paralelo com indutor) resultam em uma carga com os seguintes valores  $R_1 = 3,44002 \Omega$  e  $L_1 = 0,006848 \text{ H}$  (resistor em série com indutor). Considerando, a partir desses valores, uma impedância calculada na frequência da rede ( $Z_1 = 3,44002 + j2,582 \Omega$ ), obtém-se o fator de deslocamento ( $\cos \phi = 0,7998$ ). Assim, o resistor e indutor estimados apresentam valores bem próximos aos valores teóricos ( $R = 3,441 \Omega$  e  $L = 6,845 \text{ mH}$ ) usados na simulação. Portanto, os valores representam uma boa estimativa (caracterização) dos parâmetros da carga.

**Exemplo # 4:** A Figura 5d mostra o circuito analisado para dois casos. No primeiro caso a tensão de alimentação é senoidal (igual ao Exemplo #1) e para o segundo caso foi aplicada uma tensão não senoidal (igual ao Exemplo # 3). A fonte de tensão, por meio de uma impedância resistiva ( $R_s = 0,0018 \Omega$ ) alimenta uma carga resistiva/capacitiva ( $R = 1 \Omega$  e  $C = 1989,2 \mu\text{F}$ ). O objetivo desta carga é de discutir o efeito da variação da frequência na energia reativa e nas componentes da potência aparente. Além da tensão ser senoidal no primeiro caso, foram consideradas, três diferentes frequências de operação: 60, 55 e 63 Hz.

Como esperado, a Tabela IV, para o Caso I, mostra que, as únicas componentes de potência no circuito são: potência ativa e reativa. A componente residual é zero ( $D = 0$ ), isto devido à característica da carga (resistiva/capacitiva) e a tensão de alimentação ser senoidal. Observa-se que, diferentemente do exemplo anterior (carga RL), neste caso a energia reativa é negativa ( $W_r = -29,873 \text{ J}$ ) e a potência reativa é positiva ( $Q = 11261,948 \text{ Var}$ ). De fato, a potência reativa é calculada em base a valores eficazes ( $Q = VI_r$ ). Além disso, como a tensão é senoidal, a potência reativa também pode ser calculada pelo produto da frequência angular e a energia reativa,  $\omega W_r = |377(-29,873)| = 11261,948 = Q$ . Por outro lado, observa-se que tanto a potência aparente quanto a potência reativa são influenciadas pela variação de frequência. Assim, os valores da potência reativa são diferentes para cada frequência ( $Q_{f=60} \neq Q_{f=55} \neq Q_{f=63}$ ). Diferentemente da energia reativa e potência ativa que permanecem constantes:

$$W_{r,f=60} = W_{r,f=55} = W_{r,f=63} = -29,873 \text{ J}$$

$$P_{f=60} = P_{f=55} = P_{f=63} = 15017,343 \text{ W}$$

Ou seja, contrariamente a  $P$  e  $W_r$  que são conservativos,  $Q$  e  $A$  resultam grandezas não conservativas.

**TABELA IV**  
**Decomposição da Potência e Fatores no PAC – Exemplo # 4**

	Caso I			Caso II
$f_1$ [Hz]	60	55	63	60
$A$ [VA]	18771,043	17210,038	19114,199	20180,949
$P$ [W]	15017,343	15017,343	15017,343	15314,472
$Q$ [Var]	11261,948	10698,863	11825,059	11589,153
$D$ [VA]	0	0	0	6199,129
$W_r$ [J]	-29,873	-29,873	-29,873	-30,464
$P_1$ [W]	15017,398	15017,398	15017,398	15017,398
$P_H$ [W]	0	0	0	297,074
$\lambda$	0,8000	0,8726	0,7857	0,7589
$\lambda_Q$	0,6000	0,5802	0,6187	0,6034
$\lambda_D$	0	0	0	0,3072
$\lambda_p$	0	0	0	0,0198

É interessante notar que, quando um capacitor é alimentado com tensões não senoidais (caso II), não só gera potência reativa, mas também potência residual ( $D = 6199,129 \text{ VA}$ ). De fato, a corrente do capacitor é proporcional à derivada da tensão a ela aplicada, e não à integral da tensão como acontece com a corrente reativa. Mas isto não altera o significado físico da energia reativa, que é de qualquer forma proporcional à energia média do capacitor. Perceba-se que, neste caso, o produto da frequência angular pela energia reativa resulta

diferente da potência reativa, devido à presença das harmônicas na tensão ( $\omega W_r = 11484,928 \neq 11589,153 = Q$ ). Também vale destacar, tanto a potência ativa quanto à energia reativa, incluem as contribuições das componentes harmônicas. De fato, a energia harmônica fornecida pela fonte de alimentação, está sendo consumida pelo resistor da carga resultando num acréscimo no valor da potência ativa. Porém, similar ao exemplo anterior, a potência harmônica resulta positiva, indicando que o fluxo de energia harmônica é absorvido pelo campo elétrico do capacitor e é transformada em outras frequências harmônicas e devolvida para a fonte, incrementando as perdas na linha.

Neste caso, a energia harmônica fornecida pela fonte originou uma potência residual de 6199,129 VA. Além disso, observa-se que  $\lambda_p$  resultou positivo (0,0198), sugerindo que o fluxo harmônico é gerado pela fonte de alimentação. Como pode ser verificado, a potência ativa resulta maior que a fundamental ( $P > P_1$ ). Neste caso, 14,07 % de  $THD_V$ , provocou 1,98 % de perdas adicionais na linha. Embora a energia harmônica fornecida pela fonte tenha incrementado o valor da potência ativa devido à presença do resistor na carga, a única potência necessária para o funcionamento adequado da carga é a potência fundamental. Desta forma seu consumo deveria ser tarifado de acordo com a energia ativa fundamental (37).

De acordo com a característica da carga, portanto a energia reativa é negativa ( $W_r < 0$ ). Assim, esta carga pode ser representada como uma carga tipo fonte de tensão harmônica (Figura 3b). A impedância equivalente estimada resultou,  $Z_1 = 0,6399 - j0,4801 \Omega$ , e da Figura 5d, o valor teórico da impedância da carga ( $R$  paralelo com  $C$ ) resulta,  $Z = 0,64 - j0,47999 \Omega$ . Portanto, pode-se considerar que o circuito equivalente da carga apresentou uma boa estimativa ( $Z_1 = Z$ ).

### B. Análise de Resultados de Medição em Cargas Residenciais

A fim de validar os conceitos apresentados a partir da metodologia de caracterização de carga utilizando a CPT, um conjunto de duas cargas residenciais foram analisadas através de medições em laboratório. As medições foram realizadas utilizando um osciloscópio DPO 3014, com frequência de amostragem de 100 kHz. Neste caso, todos os algoritmos e sub-rotinas foram implementadas no software Matlab. Foram utilizadas amostras equivalentes a 6 ciclos para a obtenção dos parâmetros da carga caracterizada. Foram analisadas as seguintes cargas: lâmpada fluorescente e ventilador.

**Lâmpada fluorescente:** A Figura 8 apresenta a medição realizada para caracterização da lâmpada fluorescente, equipamento muito utilizado e presente em residências.

A Tabela V apresenta as parcelas de potência medidas para a lâmpada. Como verificado na Figura 8, esta carga possui uma elevada distorção na forma de onda da corrente ( $DHT_I = 143,52 \%$ ), o que também pode ser comprovado através do elevado valor da potência de distorção ( $D$ ). Além disso, observa-se um baixo fator de potência. Através da metodologia de caracterização de carga, verifica-se que esta carga irá se comportar como fonte de tensão devido à energia reativa apresentar valor negativo.

Os parâmetros encontrados para o circuito equivalente do tipo fonte de tensão harmônica (circuito série) foram  $R = 1,0465 \text{ k}\Omega$  e  $C = 9,98 \mu\text{F}$  e forma de onda da fonte de tensão

harmônica é mostrada na Figura 9. Estes parâmetros irão representar a lâmpada fluorescente.

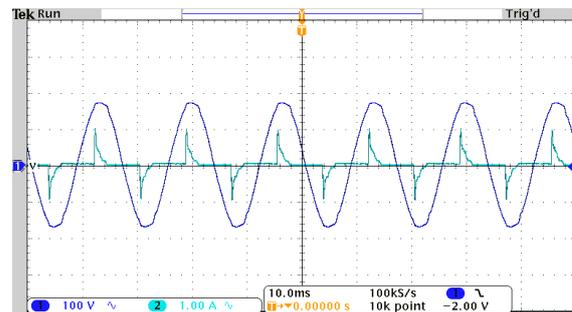


Fig. 8: Formas de onda medidas para uma lâmpada fluorescente.

**TABELA V**  
**Grandezas da CPT no PAC – Lâmpada Fluorescente**

A [VA]	P [W]	Q [Var]	D [VA]	$W_r$ [J]	$P_1$ [W]
24,1172	13,4568	3,3965	19,7246	-0,0090	13,4617
		$\lambda$	$\lambda_Q$	$\lambda_D$	$\lambda_P$
		0,5580	0,2447	0,8179	-0,0004

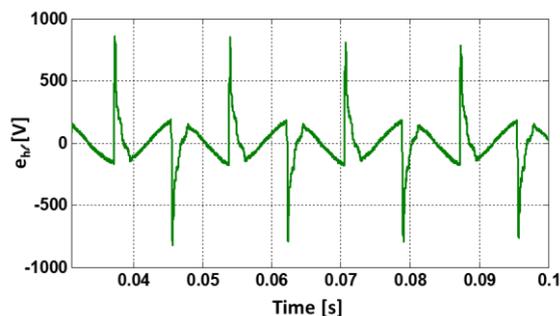


Fig. 9: Formas de onda da fonte de tensão harmônica para uma lâmpada fluorescente.

**Ventilador:** A Figura 10 representa a forma de onda da corrente e tensão de um ventilador operando em velocidade máxima. A Tabela VI apresenta as parcelas de potências medidas para esta velocidade. Verifica-se que o ventilador se comportando como fonte de corrente ( $DHT_I = 25,79 \%$ ) devido à energia reativa apresentar valor positivo. Os parâmetros encontrados para o circuito equivalente do tipo fonte de corrente (circuito paralelo) são:  $G = 0,009982 \Omega^{-1}$  e  $L = 986,245 \text{ mH}$  e a Figura 11 representa a forma de onda da fonte de corrente harmônica para a velocidade máxima.

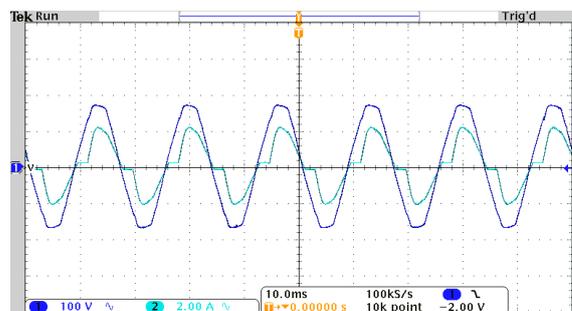


Fig. 10: Formas de onda medidas para ventilador operando com velocidade máxima.

**TABELA VI**  
**Grandezas da CPT no PAC - Ventilador em Velocidade**  
**Máxima**

A [VA]	P [W]	Q [Var]	D [VA]	$W_r$ [J]	$P_1$ [W]
159,956	150,035	40,301	38,105	0,1069	149,491
<hr/>					
$\lambda$		$\lambda_Q$		$\lambda_P$	
0,9380		0,2594		0,0036	

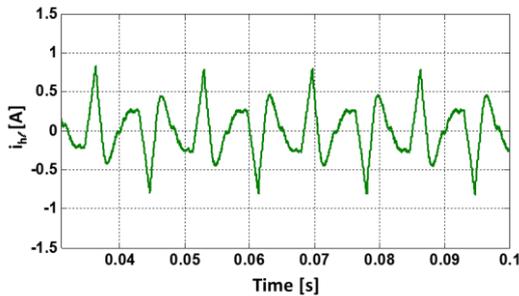


Fig. 11: Formas de onda da fonte de corrente harmônica para ventilador funcionando com velocidade máxima.

## VII. CONCLUSÕES

Para superar as limitações e deficiências da aplicação prática do fator de potência e correspondentes técnicas de medição de uso comum, um conjunto de índices de conformidade de carga e uma metodologia de caracterização de consumidores e/ou produtores (cargas lineares/não-lineares + fonte local de energia) foi discutida neste artigo, a abordagem baseia-se na Teoria de Potência Conservativa e permite a identificação dos parâmetros da carga em termos de bipolos passivos e fontes de tensão e corrente distorcíveis, e destina-se para a estimativa de procedimentos de tarifação e compensação de distúrbios (passiva e/ou ativa) em condições de operação genéricas de tensões e correntes distorcíveis, e frequência variável (ambientes de microrredes de energia elétrica). Além disso, através do estudo realizado, verifica-se também que:

- O fator de potência ( $\lambda$ ) é útil apenas para caracterizar consumidores passivos (cargas que não possuem fontes de energia local);
- Os mecanismos de limitação de fator de potência para microrredes de energia (geração distribuída) devem ser reavaliados e readequados;
- A potência ativa total ( $P = P_1 + P_H$ ), produz potência útil apenas para a carga resistiva pura;
- Para cargas que não sejam resistivas, a única potência que produz potência útil é a potência ativa fundamental ( $P_1$ );
- O fator de não conformidade da potência ativa ( $\lambda_P$ ) pode ser um índice que auxilie na identificação do fluxo harmônico entre a fonte e a carga;
- A caracterização de carga utilizando a decomposição instantânea de corrente é a mais adequada em ambiente de microrredes;
- Uma forma de tarifar os consumidores, consiste em medir a energia absorvida na frequência fundamental. Dessa forma a carga não linear estaria pagando tanto pela potência usada pela sua própria carga, como pelas perdas harmônicas que a sua carga impõe na rede.

Finalmente, a eficácia da abordagem proposta foi verificada através de simulações e dados experimentais de um conjunto de circuitos típicos de cargas residenciais e industriais.

## REFERÊNCIAS

- [1] E. Emanuel, J. Janczak, D. J. Pileggi, E. M. Gulachenski, C. E. Root, M. Breen, T. J. Gentile, "Voltage distortion in distribution feeders with nonlinear loads," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 1, pp. 79–87, Jan. 1994.
- [2] N. R. Watson, T. L. Scott, S. Hirsch, "Implications for distribution networks of high penetration of compact fluorescent lamps," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1521–1528, Jul. 2009.
- [3] *IEEE Draft Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems*, IEEE P519.1/D12, Feb. 2015.
- [4] S. M. Deckmann, J. A. Pomilio, "Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica" UNICAMP/FEEC/DSE, 2016. [Online], URL: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a5.pdf>.
- [5] F. Z. Peng, "Application Issues of Active Power Filters," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 4, no. 5, pp. 21–30, September/October 1998.
- [6] F. Z. Peng, "Harmonic Source and Filtering Approaches," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 18–25, July/August 2001.
- [7] C. Muscas, "Power Quality Monitoring in Modern Electric Distribution Systems", *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 13, no. 5, pp. 19–27, Oct. 2010.
- [8] A. Ipakchi, F. Albuyeh, "Grid of the future," *IEEE Power Energy Magazine*, vol. 7, no. 2, pp. 52–62, Mar. 2009.
- [9] H. Farhangi, "The path of the smart grid," *IEEE Power Energy Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 18–28, Jan. 2010.
- [10] R. H. Lasseter, "Smart Distribution: Coupled Microgrids", *Proceedings of the IEEE*, vol. 9 no. 6, pp. 1074–1082, June 2011.
- [11] C. P. Steinmetz, *Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena*. New York: McGraw-Hill, 1897.
- [12] A. E. Emanuel, "Power definitions and the physical mechanism of power flow", Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley; 2010.
- [13] M. Depenbrock, "The FBD-Method, a Generally Applicable Tool for Analyzing Power Relations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 381–387, May 1993.
- [14] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-20, no. 3, pp. 625–630, May/June 1984.
- [15] L. S. Czarnecki, "Orthogonal Decomposition of the Currents in a 3-phase Nonlinear Asymmetrical Circuit with a Nonsinusoidal Voltage Source," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 1, no. 37, pp. 30–34, March 1988.

- [16] P. Tenti, P. Mattavelli, H. K. Morales-Paredes, "Conservative Power Theory, Sequence Components and Accountability in smart grids," in *Proc. of IEEE International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC)*, pp.37-45, 2010.
- [17] H. K. Morales-Paredes, F. P. Marafão, L. C. P. da Silva. "A Comparative Analysis of FBD, PQ and CPT Current Decompositions – Part I: Three-phase, Three-Wire Systems," in *Proc. of IEEE PowerTech*, pp. 1-8, 2009.
- [18] F. P. Marafão, H. K. Morales-Paredes, L. C. P. da Silva, "Critical Evaluation Of Fbd, Pq And Cpt Current Decompositions For Four-wire Circuits" *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 14, no. 4, pp. 277-286, Dezembro 2009.
- [19] F. P. Marafao, E. V. Liberado, H. K. Morales-Paredes, L. C. P. da Silva, "Three-phase four-wire circuits interpretation by means of different power theories," *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 87, no. 1, pp. 28–33, January 2011.
- [20] H. K. Morales-Paredes, F. P. Marafão, P. Mattavelli, P. Tenti, "Application of Conservative Power Theory to Load and Line Characterization and Revenue Metering", in *Proc. of IEEE Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, pp. 1-6, 2012.
- [21] P. Tenti, A. Costabeber, P. Mattavelli, F. P. Marafão, H. K. Morales-Paredes, "Load Characterization and Revenue Metering Under Non-Sinusoidal and Asymmetrical Operation", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 2, pp. 422-431, Feb. 2014.
- [22] P. Tenti, H. K. Morales-Paredes, P. Mattavelli, "Conservative Power Theory, a Framework to Approach Control and Accountability Issues in Smart Microgrids," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 664-673, March 2011.
- [23] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced and Unbalanced Conditions, IEEE Standard 1459-2010.
- [24] J. P. Bonaldo, H. K. Morales-Paredes, J. A. Pomilio, "Control of Single-Phase Power Converters Connected to Low Voltage Distorted Power Systems with Variable Compensation Objectives", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 3, pp. 2039-2052, March 2016.
- [25] F. P. Marafão, D. I. Brandão, A. Costabeber, H. K. Morales-Paredes, "Multi-task control strategy for grid-tied inverters based on Conservative Power Theory" *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 2, pp. 154-165, March 2015.
- [26] J. P. Bonaldo, H. K. Morales-Paredes, A. Costabeber, J. A. Pomilio, "Adaptive Saturation System for Grid-Tied Inverters in Low Voltage Residential Micro Grids", in *Proc. of IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, pp. 784-789, 2015.
- [27] J. A. Pomilio, J. P. Bonaldo, H. K. Morales-Paredes, P. Tenti, "About power factor and THDi in the smart micro-grid scenario", in *Proc. of IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, pp. 1-5, 2015.
- [28] J. A. Pomilio, S. M. Deckmann, "Characterization and Compensation of Harmonics and Reactive Power of Residential and Commercial Loads," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no.2, pp.1049-1055, April 2007.
- [29] L.S. Czarnecki, "Critical comments on the Conservative Power Theory (CPT)", in *Proc. of IEEE International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC)*, pp. 1-7, 2015.
- [30] L.S. Czarnecki, "Physical Interpretation of the Reactive Power in Terms of the CPC Power Theory," *Electrical Power Quality and Utilization Journal*, vol. XIII, no. 1, pp. 89-95, January 2007.
- [31] H. K. Morales-Paredes, F. P. Marafão, L. C. P. da Silva, S. M. Deckmann, "Influência de Harmônicas na Tarifação de Energia Elétrica". In *Proc. of Conferência Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE)*, pp. 1-7, 2007.

#### DADOS BIOGRÁFICOS

**Helmo Kelis Morales Paredes**, possui graduação em engenharia elétrica pela Universidade Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú (2001), tem mestrado e doutorado em engenharia elétrica pela UNICAMP (2006 e 2011). Em 2009 foi pesquisador visitante na Universidade de Padova, Itália, onde trabalhou no desenvolvimento da Teoria de Potência Conservativa e a sua aplicação nas redes inteligentes. Em 2014 foi professor visitante na Universidade de Nottingham, Inglaterra, onde trabalhou no desenvolvimento de técnicas de controle para compensação de desequilíbrio em sistemas de distribuição inteligentes. Desde 2011, é professor assistente doutor no Campus de Sorocaba da UNESP. Suas principais áreas de pesquisa incluem análise, definições de termos de potência e técnicas de compensação sob condições não senoidais e/ou assimétricas, qualidade da energia elétrica, controle local e/ou cooperativo de conversores eletrônicos de potência, bem como aspectos de tarifaçao e atribuição de responsabilidades em ambientes de microrredes inteligentes. Dr. Morales-Paredes, é membro da SOBRAEP, da SBA e do IEEE. Em 2011, recebeu o "Prize Paper Award" no IEEE Transactions on Power Electronics.

**Paulo Henrique Ferreira dos Reis**, é técnico em mecânica pelo CTI-UNESP/Bauru (2006), engenheiro de controle e automação pela UNESP/Sorocaba (2013) e mestre em engenharia elétrica pela UNESP/Bauru (2015). Principais áreas de interesse: análise de circuitos elétricos sob condição não linear e atribuição de responsabilidades. Atualmente trabalha na empresa Schaeffler Brasil Ltda.

**Sigmar Maurer Deckmann**, nasceu em Cruz Alta (RS), é engenheiro eletricista (1973), mestre (1976) e doutor (1980) pela UNICAMP. Atualmente, professor aposentado da FEEC da UNICAMP, onde trabalhou desde 1974 a 2006. Suas principais linhas de pesquisa têm sido: estabilidade dinâmica de sistemas de potência, cintilação luminosa (Flicker), teoria de potência aplicada a cargas não lineares, estudos sobre propagação de harmônicas, instrumentação, qualidade da energia elétrica e filtros ativos de potência. Atualmente continua participando em projetos de análise de sistema de potência.