

ESTRATÉGIA DE SATURAÇÃO DINÂMICA DA CAPACIDADE DE CONVERSORES MULTIFUNCIONAIS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA

Jakson P. Bonaldo¹, Helmo K. M. Paredes², José A. Pomilio³

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Departamento de Engenharia Eletrônica, Campo Mourão – PR, Brasil

²Universidade Estadual Paulista – UNESP, Grupo de Automação e Sistemas Integráveis, Sorocaba – SP, Brasil

³Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Departamento de Sistemas e Energia – DSE, Campinas – SP, Brasil
e-mails: ¹jbonaldo@gmail.com, ²hmoales@sorocaba.unesp.br, ³antenor@fee.unicamp.br

Resumo – Este artigo propõe uma estratégia de controle que permite a utilização plena da capacidade de conversores multifuncionais conectados à rede elétrica. A técnica proposta é baseada na estimação dinâmica de um coeficiente de compensação (k) para melhoria do fator de potência da rede no ponto de acoplamento da unidade consumidora, incluindo uma fonte de energia com o respectivo conversor e a carga local. Assim, o sinal de referência é proporcional a k , que ajusta dinamicamente a intensidade da compensação conforme a capacidade de potência remanescente do conversor. Para demonstrar a eficácia da estratégia proposta, resultados experimentais e de simulação são obtidos considerando um cenário real, no qual tanto a carga quanto a geração são intermitentes.

Palavras-Chave – Conversores Multifuncionais, Filtro Ativo de Potência, Fontes de Energia Renovável, Interface Eletrônica de Potência, Qualidade da Energia Elétrica.

STRATEGY FOR DYNAMIC SATURATION OF THE CAPACITY OF MULTIFUNCTIONAL POWER CONVERTERS CONNECTED TO UTILITY GRID

Abstract – This paper proposes a control strategy that allows the exploitation of the full capacity of the multifunctional grid-tied inverters. The strategy is based on the dynamic estimation of a compensation coefficient (k) to improve the power factor at the point of common coupling. Thus, the reference signal is proportional to k , which dynamically adjusts the amount of compensation depending on the remaining capacity of the power converter. To demonstrate the effectiveness of the proposed strategy, experimental results and simulation are obtained considering a real case, in which both the load and generation are intermittent.

Keywords – Active Power Filter, Multifunctional Grid-Tied Inverters, Power Electronics Interface, Power Quality, Renewable Energy Sources.

Artigo submetido em 20/04/2015. Primeira revisão em 06/09/2015. Segunda revisão em 05/12/2015. Aceito para publicação em 05/12/2015, por recomendação do Editor Cassiano Rech.

I. INTRODUÇÃO

As microrredes inteligentes de energia representam um cenário interessante para o desenvolvimento de técnicas de controle para conversores multifuncionais, pois estas redes podem ser compostas por uma grande variedade de fontes renováveis de energia com comportamento intermitente, bem como por cargas com comportamento variável ao longo do dia. Neste contexto, conversores de potência, originalmente usados como interface entre a rede e a fonte renovável de energia, podem ser usados para realizar funções auxiliares, tais como regulação de tensão ou compensação de reativos e harmônicas geradas pela carga local, com o objetivo de melhorar o fator de potência no ponto de acoplamento comum (PAC) a partir de uma adequada estratégia de controle [1]-[11].

Em geral, os conversores eletrônicos de potência (CEP) são dimensionados para processar o pico de potência que pode ser produzida pela fonte local de energia (FLE). A FLE pode ser um arranjo de painéis fotovoltaicos ou uma turbina eólica, por exemplo. Entretanto, a produção de energia não é constante, podendo sofrer grandes variações ao longo do dia [12]. Além disso, a carga local também pode apresentar variações. Logo, o tipo e o nível dos distúrbios de qualidade da energia elétrica (QEE) também podem variar [13]. O uso do CEP para executar funções auxiliares é limitado, principalmente, pela capacidade remanescente do conversor, definida como a parcela de potência que não é usada para injetar energia na rede. Claramente tal capacidade remanescente varia de acordo com as condições climáticas, que causam a intermitência na geração.

Devido a este caráter intermitente das fontes e das cargas, o CEP pode atuar como interface eletrônica de potência (IEP) e filtro ativo de potência (FAP), simultaneamente, quando a potência gerada pela FLE for menor que capacidade nominal do CEP. A compensação total dos distúrbios e, por consequência, a obtenção de fator de potência unitário para a unidade consumidora ocorre apenas no caso em que a capacidade remanescente do CEP é superior à demanda relacionada aos distúrbios da carga, isto é, reativos e harmônicas de corrente. A capacidade nominal do CEP pode ser insuficiente para realizar sua função prioritária, isto é, injetar potência ativa na rede, ao mesmo tempo em que realiza tarefas auxiliares. Neste caso, a compensação dos distúrbios deve ser realizada de forma parcial, levando a uma melhora parcial nos indicadores de QEE.

Em um cenário em que a concessionária de energia remunera o cliente/produzidor que colabora com a qualidade da

energia no PAC, um CEP multifuncional permitiria um retorno mais rápido do investimento.

Os trabalhos que exploraram tal capacidade multifuncional dos CEPs injetando potência ativa e compensando todos os distúrbios da carga [1]-[7] ou compensando seletivamente estes distúrbios [8], não indicaram a necessidade de realizar a limitação automática da compensação de acordo com a capacidade remanescente do CEP.

Em [9] foi proposta uma estratégia de compensação parcial de harmônicas e reativos, causados por uma carga local, em função dos fatores de conformidade ou do fator de potência desejado no lado da rede. Esta estratégia considerava que a capacidade de potência do conversor era suficiente para atingir os níveis de compensação pré-determinados pelos fatores de conformidade escolhidos como referência, uma vez que o objetivo era validar a estratégia de compensação flexível proposta.

Assim como em [9], o presente trabalho faz uso da Teoria da Potência Conservativa, do inglês *Conservative Power Theory* (CPT) [14], para desenvolver uma estratégia de compensação flexível do fator de potência visando a compensação parcial de distúrbios, isto é, das harmônicas de corrente e da potência reativa devidas à carga local. Entretanto, neste trabalho, o fator de potência desejado na rede deixa de ser arbitrado e passa a ser definido automaticamente em função da capacidade remanescente do CEP que não é utilizada para injeção da potência ativa gerada pela FLE.

Desta forma, garante-se que o CEP buscará compensar as harmônicas e os reativos independentemente da ação de configuração externa ou malhas de controle secundárias. Assim, torna-se possível usar o potencial do CEP multifuncional de forma efetiva, evitando eventuais desconexões devidas à sobrecarga. Além disso, a estratégia multifuncional de controle e limitação da capacidade pode ser implementada em CEPs convencionais, originalmente projetados para operar como IEP, desde que seja monitorada a corrente drenada pela carga local.

Nas próximas seções é discutido o desenvolvimento da técnica de controle, sendo apresentados resultados experimentais e de simulação. Um estudo de caso baseado em uma rede de distribuição real também é analisado.

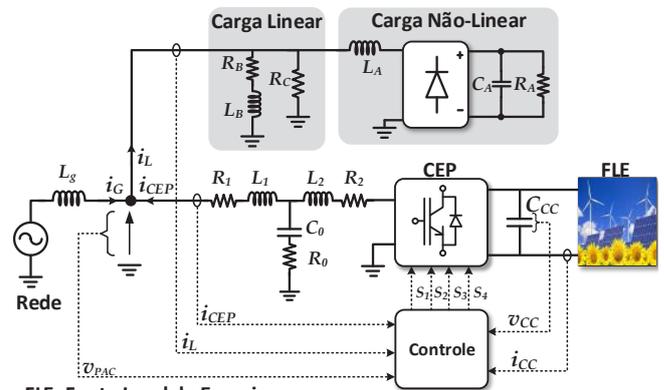
II. MODELAGEM DO SISTEMA

A Figura 1 mostra o CEP monofásico conectado à rede, cujos parâmetros são mostrados na Tabela I. A Figura 2 mostra o diagrama de blocos do sistema de controle do conversor, incluindo a estratégia proposta para realizar a limitação da potência processada pelo CEP.

O sistema de controle do CEP é composto por duas malhas de controle. A primeira é uma malha rápida para controlar a corrente de saída do CEP (i_{CEP}) e a outra malha é mais lenta, responsável por manter constante a tensão no barramento CC. Uma malha adicional é usada para controlar a corrente no indutor do conversor CC-CC do tipo *boost* que realiza a conexão da fonte local de energia ao barramento CC do inversor. Por simplicidade, tanto o conversor *boost* quanto a modelagem e o projeto do respectivo controlador são omitidos, uma vez que não exercem influência direta na estratégia de limitação da capacidade do CEP proposta neste trabalho.

TABELA I
Parâmetros do Sistema

$L_1 = 0,5 \text{ mH}; R_1 = 100 \text{ m}\Omega;$	$L_A = 1 \text{ mH}; C_A = 1 \text{ mF}; R_A = 25 \Omega;$
$L_2 = 0,5 \text{ mH}; R_2 = 100 \text{ m}\Omega;$	$L_B = 60 \text{ mH}; R_B = 4 \Omega;$
$C_o = 3 \mu\text{F}; R_o = 10 \text{ m}\Omega;$	$R_C = 100 \Omega;$
$C_{CC} = 1 \text{ mF}; V_{CC} = 300 \text{ V};$	$L_g = 0,2 \text{ mH}; R_g = 0,1 \Omega;$
Rede: 127 V / 60 Hz	



FLE: Fonte Local de Energia
CEP: Conversor Eletrônico de Potência
Fig. 1. Esquema geral do CEP multifuncional.

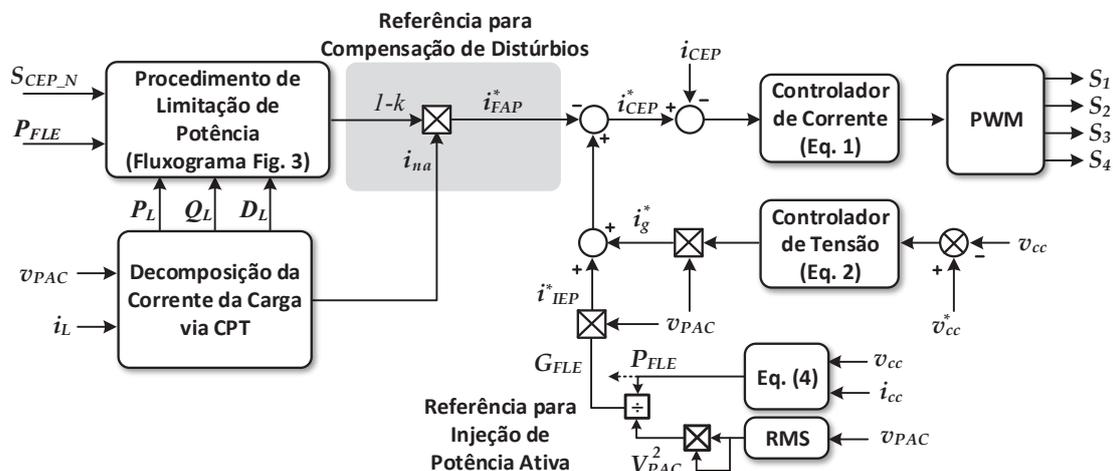


Fig. 2. Sistema geral de controle do CEP multifuncional.

O controlador da corrente de saída do CEP, $G_C(s)$, é do tipo proporcional-ressonante [15], [16], dado por:

$$G_C(s) = K_C + \sum_{h=1,3,5,\dots,15} \frac{2K_{I_{PR}}\omega_{c_{PR}}s}{s^2 + 2\omega_{c_{PR}}s + (h\omega_o)^2} \cdot \quad (1)$$

A ordem harmônica a ser compensada é representada por h , ω_o é a frequência fundamental da rede e K_C , $K_{I_{PR}}$ e $\omega_{c_{PR}}$ representam o ganho proporcional, o ganho integral e a banda passante do controlador ressonante, respectivamente.

O controle do barramento CC é responsável por manter o balanço entre a potência que é entregue ao sistema na saída do conversor e a potência no barramento CC. Conforme [5], [17], o compensador $PI_{CC}(s)$ que produz a corrente de referência para o conversor, é dado por:

$$PI_{CC}(S) = K_P + \frac{K_I}{s}. \quad (2)$$

Este controlador deve resultar em uma banda passante suficientemente estreita, evitando oscilações no valor da referência e minimizando a interação com o controlador rápido de corrente [17], [18]. A banda passante da malha de controle da tensão foi ajustada em 7 Hz, e a margem de fase em 70° . Análises complementares do sistema de controle, do filtro LCL e das malhas de controle de tensão e corrente podem ser encontradas em [9]. O período de amostragem considerado é $T_s = 38 \mu s$.

TABELA II
Parâmetros dos Controladores de Corrente e Tensão

K_c	0,95	$K_{I_{PR}}$	100
$\omega_{c_{PR}}$	5 [rad/s]	ω_o	377 [rad/s]
K_P	2,2	K_I	49
$T_s = 38 \mu s$			

III. CONTROLE FLEXÍVEL DO CEP MULTIFUNCIONAL

Antes de iniciar a discussão sobre a estratégia de limitação dinâmica de capacidade do CEP apresenta-se uma breve revisão da estratégia de controle flexível descrita em [9]. Esta estratégia possibilita injetar potência ativa na rede e simultaneamente obter valores desejados para parâmetros de QEE medidos no PAC, tais como fator de potência (λ), fator de deslocamento ($\cos\phi$) ou distorção harmônica total de corrente (DHT_I), visando atender recomendações e normas específicas de QEE, tais como PRODIST Módulo 8 [19] e IEEE 519 [20]. O funcionamento desta estratégia está baseado na decomposição da corrente da carga em parcelas ortogonais, segundo a CPT. A referência de corrente para fim de compensação é gerada pela ponderação da corrente instantânea drenada pela carga através de coeficientes de compensação (k), que são calculados mediante a escolha de valores pré-estabelecidos dos fatores de conformidade da carga, isto é, fator de potência, fator de reatividade e fator de distorção.

Neste artigo, a estratégia flexível é estendida, pois, no cálculo do coeficiente de ponderação (k) é incluída uma restrição a respeito da capacidade do CEP.

Assim, a geração da referência de corrente para o CEP multifuncional consiste de duas partes principais. Na primeira parte é gerada a referência de corrente (i_{IEP}^*) para o funcionamento do CEP como IEP, a qual deve transferir a energia gerada pela FLE para a rede elétrica, conforme:

$$i_{IEP}^* = \frac{P_{FLE}}{V_{PAC}^2} v_{PAC} = G_{FLE} v_{PAC} \quad (3)$$

onde G_{FLE} representa a condutância equivalente do CEP e P_{FLE} representa a potência líquida gerada pela FLE, a qual deve ser injetada na rede elétrica:

$$P_{FLE} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{cc}(t) i_{cc}(t) dt. \quad (4)$$

Nota-se que a corrente injetada na rede tem forma de onda igual à forma da tensão no PAC.

Na segunda parte é gerada a referência de corrente para a funcionalidade de FAP (compensação flexível do fator de potência), a qual é dada por:

$$i_{FAP}^* = i_{na} - i_{na}^* = i_{na}(1 - k). \quad (5)$$

A parcela de corrente i_{na} representa a corrente drenada pela carga local que não contribui para a transferência de potência ativa. Enquanto que i_{na}^* corresponde à parcela de corrente não ativa que continuará fluindo pela rede caso o CEP possa apenas realizar uma compensação parcial.

Em [9], [14] é demonstrado que i_{na} pode ser decomposta em duas parcelas: a corrente relacionada à energia reativa demandada pela carga e a corrente *void* devida às harmônicas [14]. A corrente não-ativa é calculada da seguinte maneira:

$$i_{na} = i_L - i_a \quad (6)$$

onde i_L representa a corrente total drenada pela carga, enquanto que i_a representa a parcela de corrente ativa. Assim, conforme a CPT [14], a corrente ativa é determinada por:

$$i_a = \frac{P}{V_{PAC}^2} v_{PAC} \quad (7)$$

onde:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v_{PAC}(t) i_L(t) dt \quad (8)$$

$$V_{PAC} = \frac{1}{T} \int_0^T [v_{PAC}(t)]^2 dt. \quad (9)$$

A corrente i_{na}^* pode ser vista como a referência de corrente não-ativa dada por:

$$i_{na}^* = k \cdot i_{na} \Leftrightarrow I_{na}^* = k \cdot I_{na} \quad (10)$$

onde I_{na}^* e I_{na} são os valores eficazes de i_{na}^* e i_{na} , respectivamente.

Portanto, o sinal de referência (i_{FAP}^*) pode ser gerado ajustando o coeficiente de compensação (k), conforme (5). Por exemplo, caso seja desejado realizar compensação de todos os distúrbios de corrente, a corrente i_{na}^* deve resultar nula ($i_{na}^*=0$), ou seja, o coeficiente de compensação deverá

ser ajustado no valor zero ($k = 0$). Assim, a corrente de compensação torna-se igual à corrente relacionada aos distúrbios da carga ($i_{FAP}^* = i_{na}$). Neste caso, o fator de potência da rede torna-se unitário. Por outro lado, se o coeficiente de compensação for ajustado para qualquer valor no intervalo $0 < k < 1$, o resultado da compensação será parcial. Observa-se que, para $k = 1$ não ocorre a compensação de distúrbios e o CEP opera apenas como IEP, injetando potência ativa na rede. Portanto, o coeficiente k pode ser usado para limitar a corrente, e por consequência a potência processada pelo CEP de acordo com a capacidade disponível para realização de tarefas auxiliares. A metodologia para cálculo dinâmico de k é apresentada e discutida na próxima seção.

Uma vez definidas as referências de corrente para compensação (i_{FAP}^*) e injeção de potência ativa na rede (i_{IEP}^*), a referência de corrente para o CEP multifuncional (i_{CEP}^*) é determinada conforme:

$$i_{CEP}^* = i_g^* + i_{IEP}^* - i_{FAP}^* \quad (11)$$

onde, i_g^* representa a referência de corrente usada para manter a tensão do barramento CC regulada. A Figura 2 mostra uma visão geral do sistema de controle e do processo de geração das referências de corrente.

É interessante notar que a estratégia para geração da referência de compensação mostrada em (10) atua para compensar indiscriminadamente os distúrbios da carga, uma vez que o objetivo é limitar a potência processada pelo conversor. Entretanto, a corrente não-ativa poderia ser decomposta em parcelas relacionadas a cada tipo de distúrbio, isto é, harmônicas e reativos, de tal forma que seria possível escolher o nível de compensação de reativos e harmônicas de forma independente, como discutido em [9].

IV. ESTRATÉGIA DINÂMICA PARA LIMITAR A POTÊNCIA PROCESSADA PELO CEP

Nesta seção é desenvolvida a estratégia para utilizar a capacidade plena do CEP multifuncional.

Considerando que o CEP opera apenas como IEP, injetando na rede toda a energia produzida pela FLE, a potência ativa injetada (P_{FLE}) modifica o fator de potência medido no lado da rede, conforme:

$$\lambda_{G,nc} = \frac{P_L - P_{FLE}}{\sqrt{(P_L - P_{FLE})^2 + Q_L^2 + D_L^2}} = \frac{P_G}{\sqrt{P_G^2 + P_{na}^2}} \quad (12)$$

onde P_G é a potência ativa que flui no lado da rede e P_{na} é a potência não-ativa demandada pela carga:

$$P_G = P_L - P_{FLE} \quad (13)$$

$$P_{na}^2 = Q_L^2 + D_L^2. \quad (14)$$

Neste caso, P_L (potência ativa), Q_L (potência reativa) e D_L (potência *void*, a qual é relacionada às harmônicas) são as parcelas de potência associadas à carga [14]. De (12), nota-se que, se $P_{FLE} = 0$, o fator de potência da rede resulta igual ao fator de potência da carga ($\lambda_G = \lambda_L$). Além disso, mostra que o fator de potência pode variar em função da potência

injetada pela FLE e em função da potência não-ativa demandada pela carga.

Em geral, há interesse em fazer com que o fator de potência no lado da rede seja unitário ($\lambda_G = 1$). Neste caso, o CEP multifuncional deve compensar todos os distúrbios causados pela carga, isto é, reativos e harmônicas. Logo, o CEP necessitaria processar uma quantia extra de potência igual à potência não-ativa da carga. Entretanto, podem ocorrer situações em que a capacidade nominal do CEP ($A_{CEP,N}$) não seja suficiente para tanto. Neste caso, uma forma para que o CEP opere dentro de sua capacidade nominal é realizar a compensação parcial de distúrbios. Desta forma, garante-se que a compensação parcial não excederá o montante de potência disponível ($A_{CEP,D}$) do CEP.

A capacidade disponível pode ser calculada conforme:

$$A_{CEP,D} = \sqrt{(A_{CEP,N})^2 - (P_{FLE})^2} \quad (15)$$

a qual pode ser interpretada como a capacidade de potência do CEP que não é usada para injetar potência ativa na rede.

No caso em que é realizada a compensação parcial, parte da potência não-ativa relacionada aos distúrbios, introduzidos pela carga, circula pela rede. Esta potência é denominada potência não-ativa residual ($P_{na,res}$) e determinada segundo:

$$P_{na,res} = P_{na} - A_{CEP,D}. \quad (16)$$

Por outro lado, de (10), $P_{na,res}$ (potência não compensada pelo CEP), pode ser relacionada com a corrente não-ativa através de:

$$P_{na,res} = V_{PAC} I_{na}^* = k \cdot V_{PAC} I_{na} \quad (17)$$

onde V_{PAC} é o valor eficaz da tensão no PAC.

Assim, a contribuição da técnica proposta para limitação da potência aparente processada pelo CEP está no fato de que o máximo fator de potência da unidade consumidora, considerando a restrição de capacidade disponível do CEP, pode ser obtido analiticamente conforme:

$$\lambda_G^* = \frac{P_G}{\sqrt{P_G^2 + (P_{na,res})^2}} = \frac{I_{Ga}}{\sqrt{I_{Ga}^2 + (I_{na}^*)^2}} \quad (18)$$

onde, I_{Ga} é o valor eficaz da corrente ativa pela rede (corrente ativa da carga somada à corrente ativa injetada pela FLE).

Finalmente, substituindo (10) e (12) em (18), chega-se à equação que determina o valor do coeficiente de compensação:

$$k = \frac{\lambda_{G,nc}}{\lambda_G^*} \sqrt{\frac{1 - \lambda_G^{*2}}{1 - \lambda_{G,nc}^2}}. \quad (19)$$

Assim, (18) garante o maior valor para o fator de potência no lado da rede, considerando a capacidade de potência disponível no CEP.

Uma vez determinado o valor do fator de potência de referência (λ_G^*), o valor do coeficiente de compensação (k) pode ser calculado mediante (19). O fluxograma da Figura 3

resume os passos necessários para obter o valor do fator de compensação (k). A baixa complexidade da técnica de saturação dinâmica proposta é devida ao uso da CPT, a qual provê uma metodologia simples para separar as componentes de corrente, ou potência, relacionadas aos distúrbios da carga.

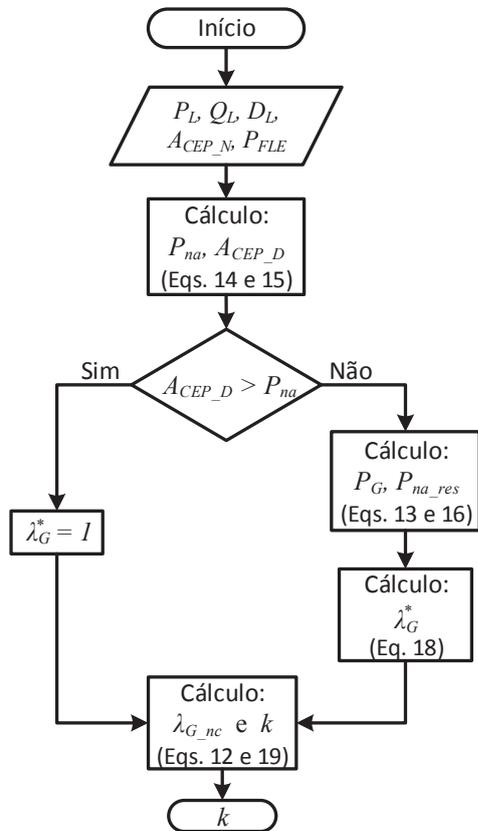


Fig. 3. Fluxograma para a estratégia de saturação dinâmica da potência processada pelo CEP multifuncional.

V. RESULTADOS DA ESTRATÉGIA PROPOSTA

O objetivo desta seção é mostrar que a potência aparente processada pelo CEP multifuncional (A_{CEP}) não excede a sua capacidade nominal, mesmo quando provendo serviços auxiliares. Os resultados são analisados e discutidos por meio de simulações, protótipo experimental e estudo de caso baseado em um cenário real.

A. Resultados de Simulação

O circuito mostrado na Figura 1 foi simulado utilizando o software PSIM. Neste caso, supõe-se que a capacidade nominal do CEP é $A_{CEP_N} = 0,9$ kVA. A Figura 4 mostra a atuação da estratégia de limitação. A simulação é iniciada com o CEP desconectado. Em $t = 0,5$ s o CEP é ligado para operar apenas como IEP, ou seja, injetar energia na rede elétrica. Nota-se que a potência processada pelo CEP é menor que sua capacidade nominal. Em $t = 1$ s é acionada a funcionalidade de compensação e o CEP passa a atuar de forma multifuncional, isto é, como FAP e IEP simultaneamente, provendo a compensação total de harmônicas de corrente e potência reativa da carga. Isto faz com que o fator de potência no lado da rede se torne unitário ($\lambda_G = 1$). No entanto, observa-se que o CEP processa uma

potência aparente maior que a sua capacidade nominal ($A_{CEP} = 1,07$ kVA). Assim, em $t = 1,5$ s é habilitada a estratégia de limitação da potência aparente. Nota-se que a potência aparente processada pelo CEP converge para o valor nominal ($A_{CEP} = A_{CEP_N} = 0,9$ kVA). Nesta condição, a referência para o fator de potência (λ_G^*) é automaticamente reajustada, e o sistema de controle do CEP opera fazendo com que o fator de potência seja praticamente igual ao valor da nova referência ($\lambda_G \approx \lambda_G^* = 0,82$).

A Figura 5 mostra os detalhes das parcelas de potências no CEP, na carga e visto pela rede. Nota-se que, durante o intervalo $1s < t < 1,5s$, o CEP compensa totalmente as parcelas de potência relacionadas aos distúrbios causados pela carga ($D_{CEP} = D_L = 377$ VA e $Q_{CEP} = Q_L = 660$ var, resultando em $D_G = 0$, $Q_G = 0$). Neste caso, o fator de potência visto pela rede torna-se unitário ($\lambda_G = 1$). Porém, o limite de capacidade do CEP é violado ($A_{CEP} = 1073$ VA). Então, a utilização da estratégia de limitação de capacidade ($t > 1,5$ s) faz com que o CEP opere dentro do limite de sua capacidade efetiva. Nota-se que, a limitação da capacidade leva à compensação parcial dos distúrbios, pois $D_{CEP} < D_L$ e $Q_{CEP} < Q_L$. Logo, parte dos distúrbios da carga circulam pela rede ($D_G > 0$ e $Q_G > 0$).

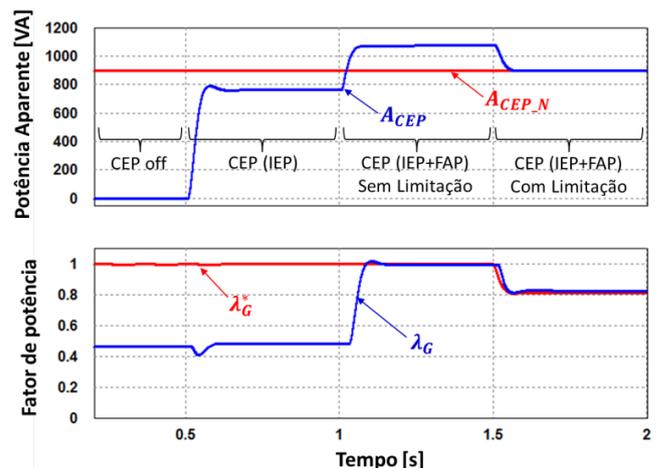


Fig. 4. Simulação da estratégia de limitação da potência aparente processada pelo CEP evidenciando o fator de potência na rede.

A atuação da estratégia de limitação quando ocorre uma perturbação importante de carga é demonstrada por meio de simulação na Figura 6. Para $t < 1,25$ s o conversor opera com a estratégia de limitação habilitada e a capacidade disponível no conversor é exatamente o suficiente para compensar plenamente o fator de potência e, portanto, a corrente pela rede (i_G) apresenta boa qualidade. Em $t = 1,25$ s ocorre um degrau de carga. Nota-se que, neste caso, a amplitude da corrente da carga (i_L) aumenta significativamente e, portanto, as potências ativa e reativa, bem como o conteúdo harmônico aumentam. Como não há capacidade de potência disponível no CEP para realizar a compensação total, a corrente do CEP não é alterada, exceto pelo rápido transitório com duração de um ciclo. A corrente da rede passa a apresentar forma de onda distorcida e defasada, pois não ocorre a compensação total, indicando que o adicional de potência reativa e potência relacionada às harmônicas da carga passa a ser suprido pela rede.

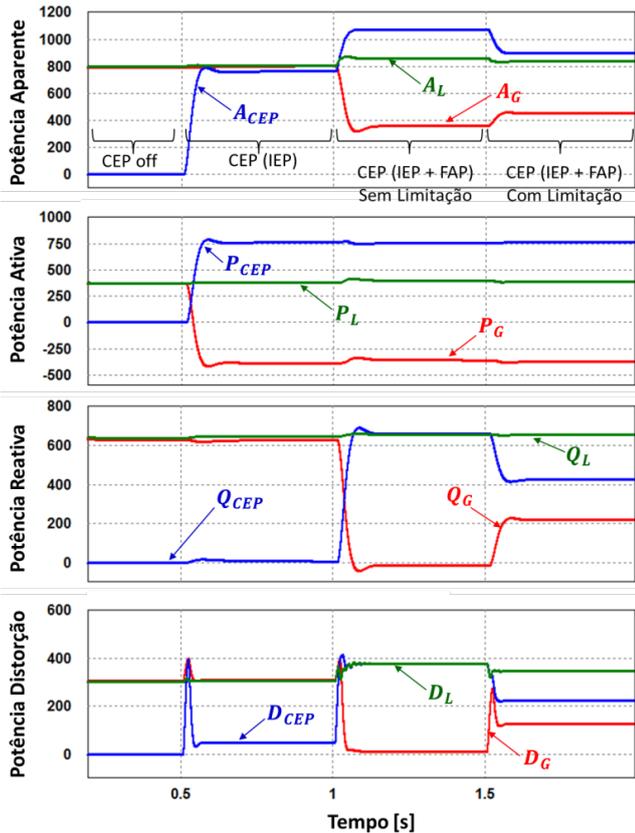


Fig. 5. Detalhe das parcelas de potência do CEP, da carga e da rede para as diferentes condições de operação abordadas na simulação do CEP multifuncional utilizando a estratégia de limitação da capacidade.

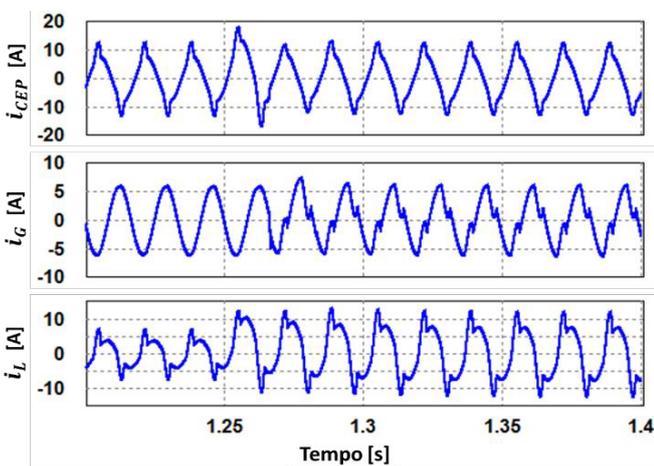


Fig. 6. Resposta transitória do sistema para um degrau de carga considerando que a limitação de potência está ativada.

B. Resultados Experimentais

Um protótipo foi construído conforme o sistema da Figura 1, cujos parâmetros são apresentados na Tabela I. Os algoritmos de controle e geração de referência, bem como a estratégia de limitação da capacidade do CEP foram implementados em um DSP TMS320F28335. O hardware de potência é composto por um inversor monofásico e uma fonte de corrente CC, a qual é baseada em topologia *boost* (conversor CC-CC) com controle em corrente. Tanto o inversor quanto o conversor *boost* são implementados usando

IGBTs Semikron SKM50GB, os quais são chaveados a uma frequência de 13 kHz.

A dinâmica de operação do sistema é descrita pela análise da tensão e da corrente, na carga, no CEP e na rede. Neste caso, o conversor é conectado diretamente à rede elétrica 127 V / 60 Hz, a qual apresenta 1,8% de distorção na 7ª harmônica.

A Figura 7 mostra o comportamento das potências aparentes medidas na carga (A_L), na rede (A_G) e na saída do CEP (A_{CEP}), bem como os fatores de potência na carga (λ_L), na rede (λ_G) e no CEP (λ_{CEP}). Observa-se que, no instante em que a estratégia de limitação é acionada, a potência aparente processada pelo CEP diminui para o seu valor nominal, consequentemente, a potência aparente pela rede (A_G) aumenta. Assim o CEP passa a compensar apenas uma fração dos distúrbios da carga. Como a potência ativa injetada pela FLE e a potência ativa demandada pela carga não sofreram alterações, o fator de potência da rede diminui (λ_G que era unitário converge para 0,9). O fator de potência da carga não muda, uma vez que a carga permanece inalterada.

A Figura 8 mostra em detalhe as formas de onda das correntes e da tensão no PAC antes e após a atuação da estratégia de limitação. Nota-se que, antes da limitação a corrente na rede é praticamente senoidal e em fase com a tensão, pois o CEP realiza a compensação total dos distúrbios ($\lambda_G = 1$). Após a aplicação da limitação, a corrente pela rede (i_G) torna-se distorcida. A compensação parcial possibilita a redução da corrente que circula pelo CEP, bem como do seu valor eficaz que diminui de 7,8 A para 6,9 A.

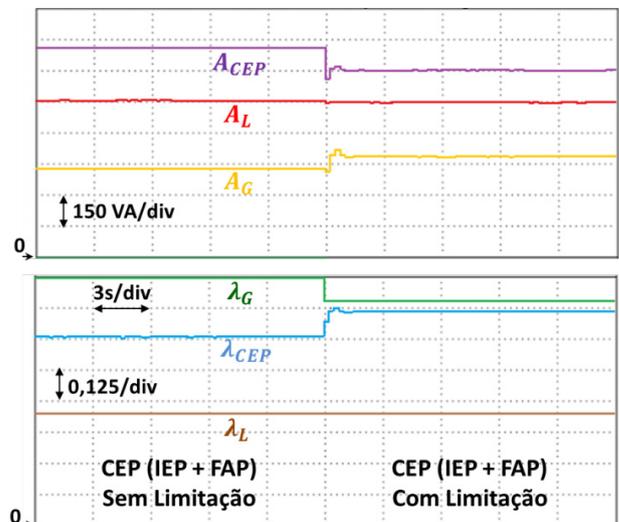


Fig. 7. Dinâmica da potência aparente e fator de potência do CEP, da rede e da carga quando habilitada a estratégia de limitação da potência aparente processada pelo CEP.

Finalmente, a Figura 9 mostra o comportamento dinâmico da corrente do CEP e a corrente pela rede quando é acionada a estratégia de limitação da potência. A amplitude da corrente pelo CEP diminui imediatamente após o acionamento da estratégia. Nota-se que o transitório da corrente da rede é suave e, conforme a Figura 8, após a habilitação da limitação, a distorção na corrente da rede aumenta devido à compensação parcial da corrente da carga.

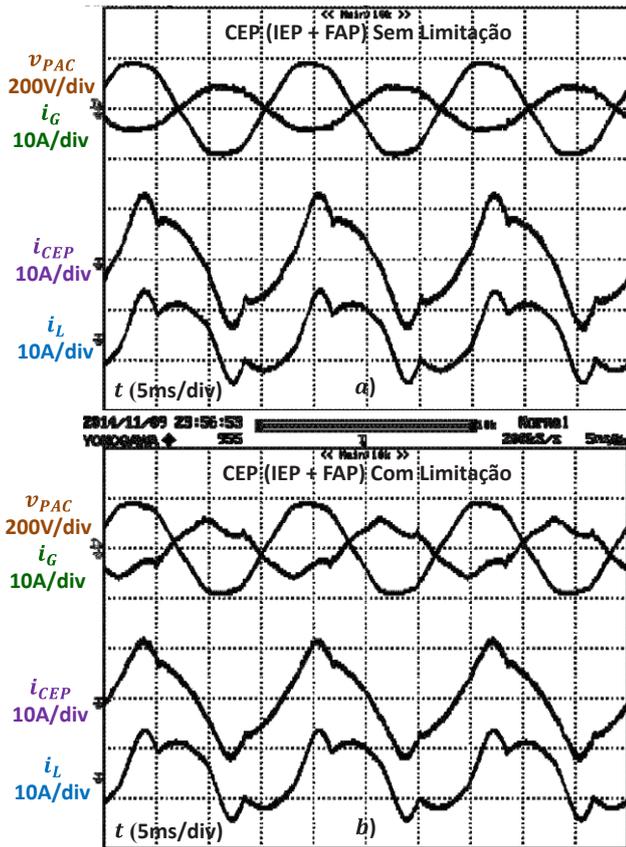


Fig. 8. Formas de onda da tensão no PAC (v_{PAC}), corrente na rede (i_G), corrente no CEP (i_{CEP}) e corrente na carga (i_L): a) antes da limitação; b) após a limitação da potência aparente.

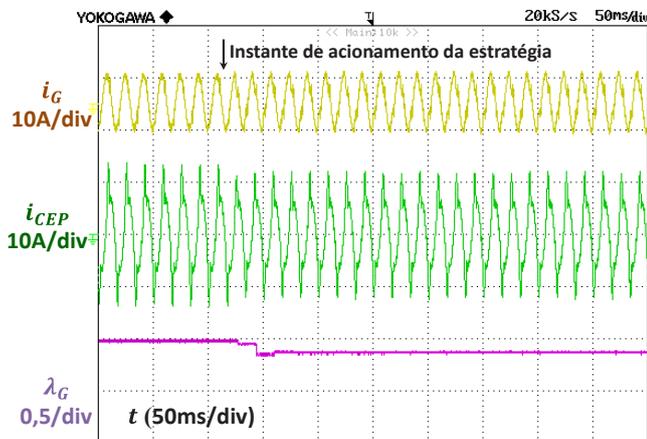


Fig. 9. Transitório de acionamento da estratégia de limitação da potência processada pela CEP. De cima para baixo tem-se: corrente na rede (i_G), corrente pelo CEP (i_{CEP}) e fator de potência na rede (λ_G).

C. Análise de Caso Baseada em um Cenário Real

Esta subseção tem por objetivo expandir os testes realizados, focando um cenário típico de aplicação de CEPs multifuncionais, no qual é considerada a intermitência das fontes renováveis de energia e a imprevisibilidade da carga. Para tanto, são usados perfis de carga (potência ativa, potência reativa e harmônicas) adaptados de [13] e um perfil de geração apresentado em [12]. O perfil da fonte de energia foi obtido através de medições realizadas em um sistema de

aproveitamento de energia solar fotovoltaica instalado no Campus da UNESP em Sorocaba. O sistema fotovoltaico pode gerar até 2 kWp. Por isto, o CEP usado nesta análise de caso tem capacidade nominal $A_{CEP} = 2$ kVA. No caso dos perfis de carga, as medições foram realizadas no secundário de um transformador de distribuição de uma rede real. Entretanto, para a presente análise, os perfis foram escalonados de forma a tornar a ordem de grandeza da potência aparente da carga compatível com a potência nominal do conversor.

Tanto o perfil de carga quanto o perfil de geração foram obtidos considerando medições realizadas durante um intervalo de dois dias. Portanto, para facilitar a visualização e análise dos dados é usada uma escala de tempo em que 100 ms de simulação equivalem a 1 hora de operação do sistema. Logo, a cada 2,4 s de simulação, tem-se um período equivalente de um dia.

A Figura 10 mostra a corrente instantânea (i_{CEP}) e a potência aparente (A_{CEP}) processada pelo CEP. Nota-se que, nas primeiras 24 horas (primeiro dia) ocorrem instantes em que a capacidade nominal do CEP é excedida, pois o algoritmo de limitação da capacidade de potência não é usado. Um pico de potência pelo CEP de 2,8 kVA ocorre às 15 horas. Este pico se deve à alta potência ativa e reativa demandada pela carga e pela geração de energia fotovoltaica, que é máxima neste intervalo de tempo.

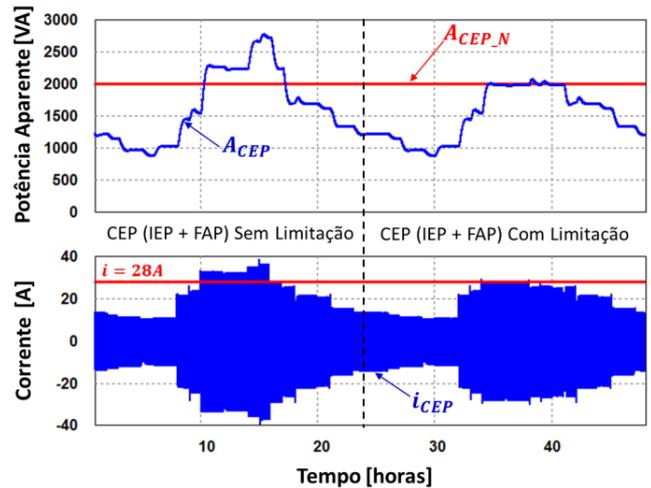


Fig. 10. Detalhe da potência aparente (A_{CEP}) e da corrente na saída (i_{CEP}) do CEP considerando o cenário real.

Após as primeiras 24 horas, que representa o início do segundo dia, o algoritmo de limitação de capacidade é ativado. Da Figura 10 observa-se que, de 24 até 30 horas, isto é, durante a madrugada, a potência processada pelo CEP é baixa (aproximadamente 1,2 kVA), pois a geração de energia fotovoltaica é nula. Durante este período o CEP não viola a sua capacidade nominal e compensa toda a potência reativa e harmônicas da carga ($\lambda_G = 1$).

No entanto, no período compreendido entre 34 e 40 horas (das 10 às 16 horas do segundo dia), a potência aparente do conversor é limitada ao seu valor nominal de 2 kVA. O CEP está injetando toda a energia produzida pela FLE na rede e, devido à capacidade remanescente limitada, a compensação dos distúrbios da carga é apenas parcial.

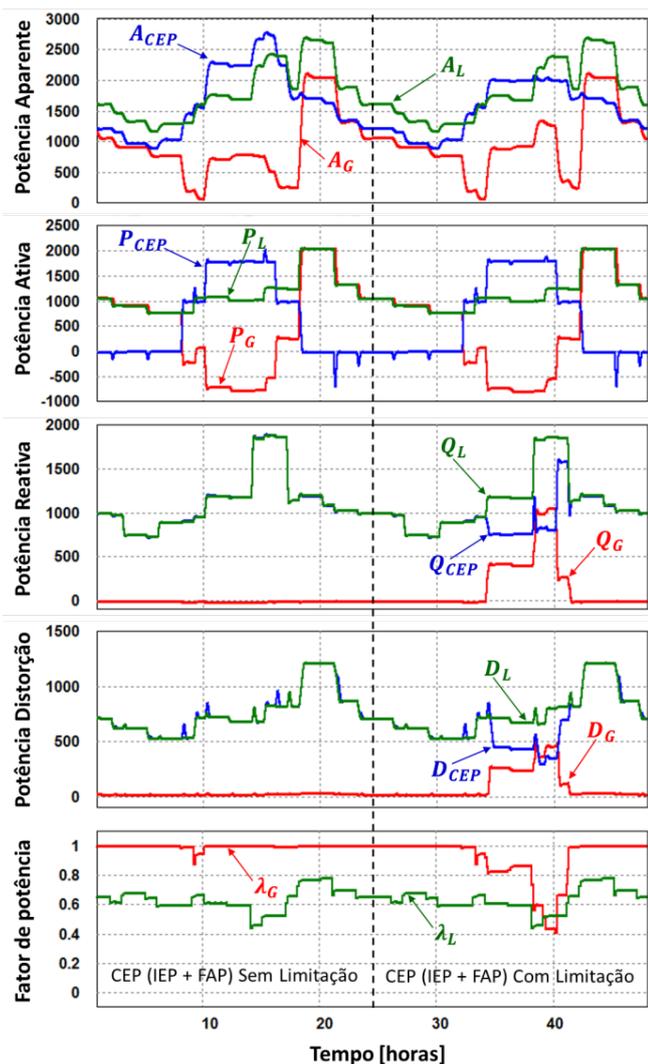


Fig. 11. Simulação do CEP multifuncional sem e com limitação de potência considerando o cenário real com carga e geração variáveis.

A Figura 11 ilustra o comportamento das potências ativa, reativa, *void* e aparente, tanto da carga quanto da rede e do CEP. Também é mostrado o fator de potência da carga (λ_L) e o fator de potência visto pela rede (λ_G). Observa-se que, diferentemente do primeiro dia em que $A_{CEP} > A_{CEP_N}$, a potência processada pelo CEP no segundo dia é mantida menor ou igual à capacidade nominal ($A_{CEP} \leq A_{CEP_N}$). Assim, o fator de potência no lado da rede resulta unitário ($\lambda_G = 1$) apenas quando a capacidade remanescente do CEP é maior que a potência não-ativa da carga. Esta situação ocorre apenas quando a injeção de energia na rede é pequena.

Nota-se que, às 16 horas do segundo dia (40 horas), devido à limitação da potência, o fator de potência visto pela rede se torna pior que o da carga. Este fato pode ser explicado por meio da equação do fator de potência dada por $\lambda_G = |P_G|/S_G$, a qual relaciona a potência ativa com a potência aparente, ambas medidas na rede. Devido aos distúrbios da carga serem apenas parcialmente compensados pelo CEP, grande parte da potência reativa e da potência *void* é fornecida pela rede, de tal forma que a potência aparente pela rede aumenta significativamente. Por outro lado, a potência ativa pela rede é menor que a potência ativa da

carga, uma vez que a potência da fonte local que não é absorvida pela carga é injetada na rede ($P_G = P_L - P_{FLE}$).

De fato, a potência aparente pela rede ($A_G = 1,2$ kVA) é menor que a potência aparente que circularia se o CEP não compensasse parte dos distúrbios. Na condição de operação convencional do CEP, isto é, sem compensar distúrbios, circularia pela rede uma potência $A_G = 2,1$ kVA. Logo, apesar do fator de potência muito baixo, as perdas na rede são menores após a compensação parcial, pois a compensação parcial contribui para diminuir a potência que circula pela rede. Portanto, em sistemas nos quais estão conectados conversores multifuncionais, deve-se analisar com cuidado o significado do fator de potência que, em geral, é usado como um dos principais indicadores de QEE. Este assunto vem sendo discutido detalhadamente em [21], o qual indica a necessidade de rever a maneira de verificação do fator de potência em um cenário com geradores junto à unidade consumidora.

VI. CONCLUSÃO

Este artigo propôs uma estratégia de saturação dinâmica da potência aparente processada por CEPs multifuncionais, considerando cargas variáveis bem como o comportamento imprevisível das fontes renováveis de energia.

A estratégia de limitação permite que a capacidade disponível no CEP, seja usada para compensar distúrbios causados pela carga, tais como circulação de harmônicas e reativos, melhorando a QEE no ponto de acoplamento do CEP.

Conforme demonstrado com resultados experimentais e de simulações, mesmo quando a capacidade remanescente do CEP é insuficiente para produzir fator de potência unitário na rede, a QEE medida no PAC melhora. Isto se deve ao fato de que o CEP fornece parte da potência, ou corrente, relacionada aos distúrbios da carga e, portanto, uma fração destes distúrbios (fração esta que depende da capacidade remanescente disponível do CEP) deixa de circular pela rede.

Ainda é importante frisar que, normas para geradores fotovoltaicos atuais, tais como NBR 16149, NBR 16150, NBR IEC 62116 [22]-[24], não permitiriam o uso da estratégia proposta. Entretanto tais normas, como já começa a acontecer em outros países [25], deveriam ser revistas, pois a atual legislação subutiliza o potencial dos inversores, especialmente em um cenário de redes inteligentes.

Também é interessante destacar que a estrutura proposta para operação multifuncional do conversor pode, além de compensar o fator de potência no ponto de acoplamento, ser utilizada para regular o nível de tensão no PAC. Neste caso, bastaria alterar a lei de controle, para injetar reativos ao invés de compensá-los, de modo a garantir a conformidade dos níveis de tensão no PAC.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Semikron. Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (processo 2011/15884-6) e (processo 2013/08545-6).

REFERÊNCIAS

- [1] P. G. Barbosa, L. G. B. Rolim, E. H. Watanabe, R. Hanitsch, "Control strategy for grid-connected DC-AC converters with load power factor correction", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib*, vol. 145, no. 5, pp. 487-491, Setembro 1998.
- [2] J. P. Pinto, R. Pregitzer, L. F. C. Monteiro, J. L. Afonso, "3-phase 4-wire shunt active power filter with renewable energy interface", in *Proc. of IEEE ICREPQ*, pp. 1-6, 2007.
- [3] R. Carnieletto, S. Suryanarayanan, M.G. Simoes, F.A. Farret, "A Multifunctional Single-Phase Voltage Source Inverter in Perspective of the Smart Grid Initiative", in *Proc. of IEEE IAS*, pp. 1-7, 2009.
- [4] L. F. C. Monteiro, J. L. Afonso, J. G. Pinto, E. H. Watanabe, M. Aredes, H. Akagi, "Compensation Algorithms Based On The P-q And Cpc Theories For Switching Compensators In Micro-grids", *Eletrônica de Potência*, vol. 14, no. 14, pp. 259-268, Dezembro 2009.
- [5] R. M. Moreno, J. A. Pomilio, L. C. Pereira da Silva, S. P. Pimentel, "Mitigation Of Harmonic Distortion By Power Electronic Interface Connecting Distributed Generation Sources To A Weak Grid", *Eletrônica de Potência*, vol. 14, no. 14, pp. 269-276, Dezembro 2009.
- [6] P. M. de Almeida, P. G. Barbosa, A. A. Ferreira, H. A. C. Braga, P. F. Ribeiro, "Controle E Redução Das Correntes Harmônicas de um Sistema De Geração Fotovoltaico Interligado à Rede Elétrica Sem Filtros Passivos", *Eletrônica de Potência*, vol. 18, no. 4, pp. 1149-1160, Novembro 2013.
- [7] R. Q. Machado, S. Buso, J.A. Pomilio, F. P. Marafão, "Three-phase to single-phase direct connection rural cogeneration systems", in *Proc. of IEEE APEC*, vol.3, pp. 1547-1553, 2004.
- [8] D. I. Brandão, F. P. Marafão, F. A. S. Gonçalves, M. G. Villalva, J. R. Gazoli, "Estratégia De Controle Multifuncional Para Sistemas Fotovoltaicos De Geração De Energia Elétrica", *Eletrônica de Potência*, vol. 18, no. 4, pp. 1206-1214, Novembro 2013.
- [9] J. P. Bonaldo, H. K. M. Paredes, J. A. Pomilio, "Controle Flexível Para Conversores Monofásicos Conectados A Sistemas Elétricos Distorcidos De Baixa Tensão", *Eletrônica de Potência*, vol.19, no. 4, pp.354-367, Setembro 2014.
- [10] L. P. Sampaio, M. A. G. Brito, G. A. Melo, C. A. Canesin, "Inversor Monofásico Para Geração Distribuída Conectada À Rede Elétrica, Com Injeção De Potência Ativa E Capacidade De Compensação Reativa", *Eletrônica de Potência*, vol. 19, no. 1, pp. 90-97, Fevereiro 2013.
- [11] R. B. Godoy, H. Z. Maia, F. J. Teixeira Filho, L. Galotto Junior, J. O. P. Pinto, G. S. Tatibana, "Projeto e Desenvolvimento de um Sistema Inversor para Fontes de Energia Renovável com Conectividade à Rede Elétrica", *Eletrônica de Potência*, vol. 12, no. 2, pp. 155-162, Julho 2007.
- [12] UNESP Sorocaba, "Instalação de Sistema Fotovoltaico para Geração de Energia", 2015. [Online]. Disponível: <http://www.sorocaba.unesp.br/#!/noticia/485/novidades-no-campus-concretizadas-pelo-gasi-/>.
- [13] J. A. Pomilio, S. M. Deckmann, "Caracterização e Compensação de Harmônicos e Reativos de Cargas Não-lineares Residenciais e Comerciais" *Revista Eletrônica de Potência*, Vol. 11, No. 1, pp. 9-16, Março 2006.
- [14] P. Tenti, H. K. M. 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, Março 2011.
- [15] I. J. Gabe, V. F. Montagner, and H. Pinheiro, "Design and implementation of a robust current controller for VSI connected to the grid through an LCL filter," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 24, no. 6, pp. 1444-1452, Junho 2009.
- [16] A. Hasanzadeh, O. C. Onar, H. Mokhtari, A. Khaligh, "A Proportional-Resonant Controller-Based Wireless Control Strategy With a Reduced Number of Sensors for Parallel-Operated UPSs," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 1, pp. 468-478, Janeiro 2010.
- [17] R. Curtri, L. Matakas, "Reference currents determination techniques for load unbalance compensation", in *Proc. of COBEP*, pp. 864-869, 2003.
- [18] P. Mattavelli and S. Buso, *Digital Control in Power Electronics*. 1st ed. Morgan & Claypool Publishers, 2006.
- [19] *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*, ANEEL PRODIST Módulo 8, Rev. 6, 2015.
- [20] *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE Std. 519, 2014.
- [21] J. A. Pomilio, J. Bonaldo, H. K. M. Paredes, P. Tenti, "About power factor and THDI in the smart micro-grid scenario", COBEP 2015. (Aceito para publicação).
- [22] *Características da interface de conexão de sistemas fotovoltaicos (FV) com a rede elétrica de distribuição*, ABNT NBR 16149, 2013.
- [23] *Características da interface de conexão de sistemas fotovoltaicos (FV) com a rede elétrica de distribuição – Procedimento de ensaio de conformidade*, ABNT NBR 16150, 2013.
- [24] *Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica*, ABNT NBR 62116, 2012.
- [25] *Pacific Gas and Electric Company Rules for Generating Facility Interconnections*, Electric Rule No. 21, Section H.2.i, 2015.

DADOS BIOGRÁFICOS

Jakson Paulo Bonaldo, engenheiro eletricitista (2008) pela Universidade Federal de Mato Grosso, mestre (2010) e doutor (2015) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas. De 2010 a 2011 atuou como engenheiro de tecnologia na Padtec Optical Components and Systems em Campinas. Desde 2013 é professor adjunto na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus

Campo Mourão. Suas principais áreas de interesse incluem conversores eletrônicos para fontes alternativas de energia, controle digital e microrredes inteligentes. É membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP).

Helmo Kelis Morales Paredes, possui graduação em Engenharia Elétrica (Bacharel e Engenheiro Eletricista) pela Universidade Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú (2001), tem Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2006 e 2011, respectivamente). De 10/2009 a 06/2010 foi pesquisador visitante na Universidade de Padova, Itália, onde trabalhou no desenvolvimento da Teoria de Potência Conservativa e a sua aplicação nas redes inteligentes (smart grids). De 11/2014 a 01/2015 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 (smart distribution systems,). Desde 2011, é professor assistente doutor da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Campus de Sorocaba. 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 e eficiência energética mediante o controle local e/ou cooperativo de conversores eletrônicos de potência, bem como aspectos de tarifação e atribuição de responsabilidades em ambientes de redes e

microrredes inteligentes. Dr. Morales-Paredes, é membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP), da Sociedade Brasileira de Automática (SBA) e do IEEE. Em 2011, recebeu o “Prize Paper Award” no IEEE Transaction on Power Electronics”.

José Antenor Pomilio, engenheiro eletricista (1983), mestre (1986) e doutor (1991) em Eng. Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas. De 1988 a 1991 foi chefe do grupo de eletrônica de potência do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Realizou estágios de pós-doutoramento junto à Universidade de Pádua (1993/1994 e 2015) e à Terceira Universidade de Roma (2003), ambas na Itália. Foi presidente da Associação Brasileira de Eletrônica de Potência - SOBRAEP e membro de diversas diretorias desta entidade. Foi coordenador do Comitê de Eletrônica de Potência e Máquinas Elétricas da Sociedade Brasileira de Automática, SBA (duas gestões) e membro eleito do Conselho Superior desta Sociedade por dois mandatos. Foi membro do comitê administrativo da IEEE Power Electronics Society por 4 anos. É editor associado da Transactions on Power Electronics (IEEE). Foi editor de Eletrônica de Potência, publicação científica da SOBRAEP. É Professor Titular da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da Unicamp, onde trabalha desde 1984. Foi coordenador do curso de Engenharia Elétrica e diretor da FEEC.