

CONTROLE FLEXÍVEL PARA CONVERSORES MONOFÁSICOS CONECTADOS A SISTEMAS ELÉTRICOS DISTORCIDOS DE BAIXA TENSÃO

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

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

²Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Sorocaba, Grupo de Automação e Sistemas Integráveis – GASI
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 trabalho apresenta uma técnica de controle flexível para conversores eletrônicos de potência, que podem funcionar como filtro ativo de potência, como interface entre uma fonte de energia local e a rede ou realizar ambas as funções simultaneamente. Desta forma se pode compensar distúrbios de corrente e injetar potência na rede elétrica ao mesmo tempo, configurando o conversor como um dispositivo multifuncional. O principal objetivo é usar toda a capacidade do conversor para atingir o máximo de benefícios quando este é instalado junto à rede elétrica. Para tal é utilizada a decomposição ortogonal da corrente da Teoria de Potência Conservativa. Cada componente ortogonal da corrente é ponderada por fatores de compensação (k_i), que são ajustados instantaneamente de forma independente, em qualquer porcentagem, mediante os fatores de conformidade da carga (λ_i), proporcionando, assim, uma flexibilidade online em relação aos objetivos de compensação. Finalmente, resultados experimentais e de simulações são apresentados para validar a eficácia e o desempenho da abordagem proposta.

Palavras-Chave – Controle Flexível, Fatores de Conformidade da Carga, Filtro Ativo de Potência, Fontes de Energia Renovável, Geração Distribuída, Qualidade da Energia Elétrica, Teoria de Potência Conservativa.

FLEXIBLE CONTROL FOR SINGLE-PHASE CONVERTER ON DISTORTED LOW VOLTAGES POWER SYSTEMS

Abstract – This paper presents a technique to add flexibility in the control of power electronic converters. The power converter can function as an active power filter, as a local power source interface or perform both functions i. e. mitigate current disturbances and inject power into the grid simultaneously, configuring it as a multifunctional device. The main goal is to extract the full capability of the grid connected power electronic converter to achieve maximum benefits. To achieve this goal, the orthogonal current decomposition of the

Conservative Power Theory is used. Each orthogonal current component is weighted by means of different compensation factors (k_i), which are set instantaneously and independently, in any percentage by means of the load performance factors (λ_i), providing an online flexibility in relation to compensation objectives. Finally, in order to validate the proposed approach, simulations and experimental results are presented.

Keywords - Active Power Filter, Conservative Power Theory, Distributed Generation, Flexible Control, Power Quality, Renewable Energy, Load Conformity Factors.

I. INTRODUÇÃO

Em geral, as microrredes podem ser definidas como redes de baixa tensão com geradores distribuídos (geração fotovoltaica, geração eólica, microturbinas, células a combustível, etc.) em conjunto com dispositivos de armazenamento 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). Um dos focos de pesquisa das IEPs é concentrado na melhoria da sua confiabilidade e na redução de custos [1]-[3]. A conveniência econômica pode ser obtida não só com os dispositivos mais baratos, mas também oferecendo mais funcionalidades. A otimização do desempenho global do sistema elétrico é um dos mais importantes aspectos para a viabilidade dos sistemas de geração distribuída. Atualmente, os conversores eletrônicos de potência (CEP) são responsáveis pela interface entre os geradores distribuídos e a rede elétrica, e estão sendo cada vez mais utilizados para realizar diversas funções, como por exemplo, injetar potência na rede e minimizar os distúrbios relacionados à qualidade da energia elétrica (QEE) [4]-[13]. A Figura 1 mostra uma estrutura usada para injetar pequenas quantidades de energia na rede.

Por outro lado, devido ao crescente uso das fontes de energia renováveis de caráter intermitente, a capacidade disponível durante a injeção de potência pode não ser a adequada ou suficiente para tratar os problemas de QEE no ponto de acoplamento comum (PAC). Por exemplo, o comportamento de um sistema fotovoltaico, fonte renovável mais comum nos ambientes de microrredes de baixa tensão, além de depender do horário de funcionamento, também é intermitente e imprevisível, como se observa na Figura 2.

Artigo submetido em 07/04/2014. Primeira revisão em 24/05/2014, segunda revisão em 18/09/2014. Aceito para publicação em 18/09/2014, por recomendação do Editor Cassiano Rech.

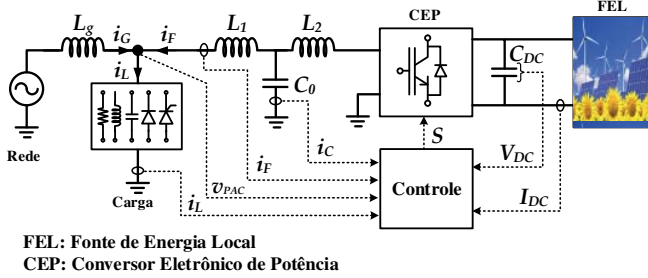


Fig. 1. Esquema geral do CEP multifuncional.

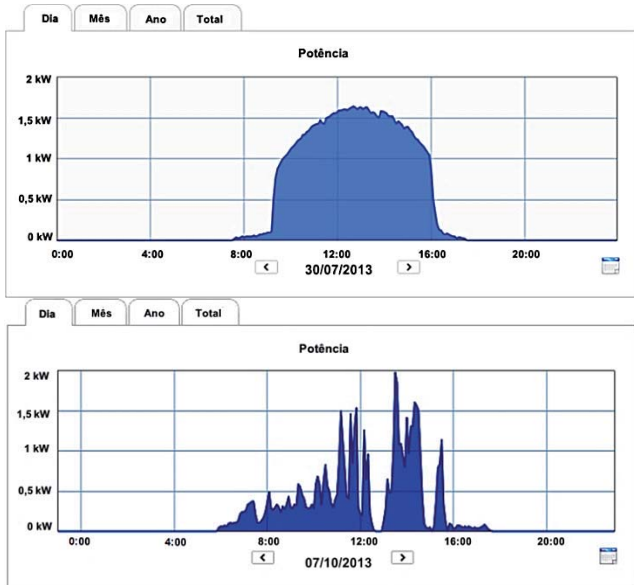


Fig. 2. Evolução diária da potência gerada por módulos fotovoltaicos em diferentes épocas do ano.

Na maioria dos casos de uso multifuncional o CEP é destinado a compensar todos os distúrbios da corrente [14]-[16] ou apenas um subconjunto das componentes indesejadas da corrente [17]-[21]. Embora a solução ideal seja compensar todas as componentes indesejadas da corrente, muitas vezes é necessário compensar apenas uma porcentagem ou uma específica componente indesejada da corrente, devido principalmente à limitação da capacidade do CEP. Além disso, os objetivos de compensação podem variar ao longo do tempo, como é o caso das fontes de energia intermitentes da Figura 2. Assim, para alcançar o máximo de benefícios e usar a capacidade máxima dos CEP, isto é, injetar potência ou compensar distúrbios, são necessárias estratégias adequadas de controle que levem à utilização plena dos conversores.

Neste sentido, a utilização da Teoria de Potência Conservativa (CPT) apresentada em [22] e [23] é sugerida como uma alternativa para o controle de CEPs, a qual é capaz de compensar, simultaneamente, em forma individual ou parcial os problemas como: fator de potência, harmônicas de corrente e também injetar a energia gerada por fontes locais, renováveis ou não. Assim, neste trabalho é apresentada uma nova técnica de geração de sinais de referência para CEP que proporciona flexibilidade online em relação aos objetivos de compensação e à injeção da energia disponível na fonte de energia local. A estratégia de controle proposta é baseada na decomposição ortogonal da corrente

da CPT, sendo uma alternativa ao sistema de filtros tipicamente usados para extrair os componentes desejados ou indesejados das correntes da carga. Desta forma, as restrições de QEE no PAC podem ser rigorosamente mantidas dentro dos limites das normas, sem custos adicionais de hardware, extraindo a capacidade máxima do CEP.

Finalmente, resultados de simulação e experimentais serão analisados, ambos considerando um sistema elétrico com impedância de linha razoavelmente elevada, tensão não senoidal e carga não linear ligada no PAC. Esta estrutura é adotada por ser muito comum nas microrredes de baixa tensão, sendo este o ambiente propício para conectar pequenas unidades de geração distribuída de energia (fonte renovável ou não).

II. FUNDAMENTO TEÓRICO

A Teoria de Potência Conservativa do inglês *Conservative Power Theory* (CPT), proposta em [22] e [23] é definida no domínio do tempo e pode ser aplicada em sistemas monofásicos e polifásicos, com ou sem condutor de retorno, com formas de onda senoidais ou não, equilibradas ou não, de período T e frequência angular $\omega = 2\pi/T$.

Assim, a corrente medida no PAC, em um sistema monofásico qualquer, pode ser decomposta como:

$$i = i_a + i_r + i_v = i_a + i_{na} \quad (1)$$

onde i_a é a corrente ativa, i_r é a corrente reativa, i_v é a corrente residual e i_{na} é a corrente não ativa.

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

$$i_a = \frac{\langle v, i \rangle}{V^2} v = \frac{P}{V^2} v = G_e v \quad (2)$$

tal que, V é o valor eficaz (norma Euclidiana) da tensão e o parâmetro G_e é a condutância equivalente. Em (2) a operação $\langle \cdot, \cdot \rangle$ representa o produto interno entre a tensão e a corrente, ou seja:

$$\langle v, i \rangle = P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt. \quad (3)$$

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

$$i_r = \frac{\langle \hat{v}, i \rangle}{\hat{V}^2} \hat{v} = \frac{W}{\hat{V}^2} \hat{v} = B_e \hat{v} \quad (4)$$

tal que, \hat{v} é a integral sem valor médio da tensão e o parâmetro B_e é a reatidade equivalente. A energia reativa é obtida pelo cálculo do produto interno entre a integral da tensão sem valor médio e a corrente no PAC:

$$\langle \hat{v}, i \rangle = W = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{v}(t)i(t)dt. \quad (5)$$

A *corrente residual* é aquela que não transfere potência ativa nem energia reativa e é dada por:

$$i_v = i - i_a - i_r. \quad (6)$$

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

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 + I_v^2 = I_a^2 + I_{na}^2. \quad (7)$$

Diferentemente de I_a , todas as outras parcelas de corrente caracterizam um aspecto não ideal da carga. Outras discussões sobre tais correntes e componentes de potência podem ser encontradas em [23]. Note-se que, todas as equações são válidas independentemente da forma de onda da tensão, que pode ser distorcida e desequilibrada (caso trifásico).

III. DECOMPOSIÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

A fim de caracterizar os diferentes aspectos da operação de uma carga no PAC, que afetam o fator de potência global, é possível decompor o fator de potência em vários índices de conformidade [23]-[25]. Tais índices são chamados fatores de conformidade de carga e são baseados na decomposição ortogonal da corrente, anteriormente apresentada.

O fator de conformidade global é o fator de potência (λ), que pode ser calculado independentemente das formas de onda da tensão e corrente, tal como:

$$\lambda = \frac{I_a}{\sqrt{I_a^2 + I_{na}^2}} = \frac{I_a}{I} = \frac{P}{A} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt}{VI}. \quad (8)$$

Como as correntes residuais contêm todas as frequências harmônicas que não geram potência ativa nem energia reativa, estas correntes podem ser vistas como a representação, no domínio do tempo, da distorção harmônica total (DHT) de corrente. Portanto, o valor eficaz da corrente residual poderia ser utilizado para calcular o índice de distorção, que seria equivalente à distorção harmônica total para condições não senoidais. Assim, o *fator de distorção* (λ_D) é definido como:

$$\lambda_D = \frac{I_v}{\sqrt{I_a^2 + I_r^2 + I_v^2}} = \frac{I_v}{I}. \quad (9)$$

Note-se que, λ_D desaparece apenas se as correntes residuais são reduzidas a zero ($i_v = 0$). Apenas no caso de tensões senoidais λ_D pode ser associado com a tradicional DHT de corrente, através da seguinte relação:

$$\lambda_D = \frac{DHT_I}{\sqrt{1 + DHT_I^2}}. \quad (10)$$

Para níveis de distorção harmônica total de corrente, de até 30%, o fator de distorção é praticamente igual à DHT de corrente, ou seja, $\lambda_D \cong DHT_I$.

Similarmente, o tradicional fator de deslocamento, $\cos \phi$, utilizado na análise de sinais senoidais, também pode ser generalizado para sinais de tensões e correntes não senoidais mediante o *fator de reatividade*, o qual é definido como:

$$\lambda_Q = \frac{I_a}{\sqrt{I_a^2 + I_r^2}}. \quad (11)$$

Observa-se que, independentemente das formas de onda dos sinais de tensão e corrente, λ_Q indica o deslocamento de fase entre a tensões e a corrente, o qual é provocado por elementos armazenadores de energia (indutores e capacitores) ou até mesmo por cargas não lineares. Note-se que, λ_Q torna-se unitário apenas se a corrente reativa for reduzida a zero ($i_r = 0$). Para o caso de tensão e corrente senoidais o fator de reatividade é igual ao fator de distorção.

Finalmente, considerando as equações (8), (9) e (11), o fator de potência pode ser dado por:

$$\lambda = \lambda_Q \sqrt{(1 - \lambda_D^2)}. \quad (12)$$

Observa-se que, (12) resulta unitária 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. Assim, a presença de quaisquer outros tipos de distúrbios (defasagem e/ou harmônicas) afetam o fator de potência.

IV. ESTRATÉGIA DE CONTROLE FLEXÍVEL PROPOSTA

Com base nos fatores de conformidades da carga, definidos no item anterior, esta seção apresenta uma técnica de controle flexível de CEPs monofásicos, os quais podem ser conectados em redes de distribuição de baixa tensão, senoidais ou distorcidas. Além disso, as cargas ligadas ao PAC podem ser lineares ou não lineares. Assim, a referência de corrente gerada pela estratégia flexível deve levar à compensação (parcial ou total) de diferentes distúrbios e/ou injetar potência ativa na rede. A referência de corrente pode ser gerada de forma a melhorar a forma de onda de corrente pela rede, conforme limites preestabelecidos por normas de QEE, de acordo com a disponibilidade de energia da fonte local e da capacidade nominal do CEP.

A. Geração Flexível da Referência de Corrente para Compensação de Distúrbios

Para este efeito, a componente de corrente que deve ser compensada é dada por (13). O índice “x” representa uma estratégia de compensação seletiva, por exemplo, a corrente reativa, a corrente residual ou a corrente não ativa; e k_x é o coeficiente de compensação associado a cada componente de corrente. Note-se que k_x pode variar de 0 a 1, e $k_x = 0$ corresponde a compensação total de um distúrbio específico. Neste caso, a referência de compensação é igual à componente de corrente de distúrbio, isto é, $i_{refx} = i_x$.

$$i_{refx} = i_x - k_x i_x = i_x(1 - k_x). \quad (13)$$

Quando $k_x \neq 0$, a corrente remanescente (não compensada) e o valor eficaz desta componente são dados respectivamente por:

$$i_x^* = i_x - i_{ref} = k_x i_x \quad (14)$$

$$I_x^* = k_x I_x. \quad (15)$$

Assim, considerando todas as componentes ortogonais de corrente a serem compensadas, isto é, corrente reativa, corrente residual ou corrente não ativa, os novos fatores de conformidade (desejados) podem ser calculados por:

$$\lambda_D^* = \frac{I_v^*}{\sqrt{I_a^2 + I_r^2 + I_v^{*2}}} \quad (16)$$

$$\lambda_Q^* = \frac{I_a}{\sqrt{I_a^2 + I_r^2}} \quad (17)$$

$$\lambda^* = \frac{I_a}{\sqrt{I_a^2 + I_{na}^{*2}}} \quad (18)$$

Observa-se que, devido à propriedade de ortogonalidade entre as componentes de corrente, cada fator de conformidade da carga pode ser ajustado de forma independente, em qualquer porcentagem, proporcionando, assim, a flexibilidade no que diz respeito aos objetivos de compensação, isto é, melhoria da QEE.

1) *Compensação do fator de distorção* - De (9), (16) e substituindo o índice “x” por “v”, que representa a corrente residual, em (15), o coeficiente de compensação do fator de distorção resulta em:

$$k_v = \frac{\lambda_D^*}{\lambda_D} \sqrt{\frac{1 - \lambda_D^2}{1 - \lambda_D^{*2}}} \quad (19)$$

Assim, para um valor predeterminado do fator de distorção, λ_D^* , que atenda, por exemplo, a uma norma de QEE específica, o valor de k_v é facilmente obtido, conforme (19). A faixa de variação dos valores de λ_D^* está entre 0 e λ_D , que representa o fator de distorção medido da carga.

Logo, substituindo (19) em (13), pode ser calculada a corrente de referência que permita a compensação parcial ou total do fator de distorção. Nota-se que, quando o valor desejado de λ_D^* é zero ($\lambda_D^* = 0$), o correspondente coeficiente também resulta zero ($k_v = 0$). Neste caso, a corrente de referência para o CEP resulta idêntica à corrente residual ($i_{ref} = i_v$). Isso significa que o CEP compensa todo o fator de distorção, resultando corrente senoidal no PAC.

2) *Compensação do fator de reatividade* - De (11), (17) e substituindo o índice “x” por “r”, corrente reativa, em (15), o coeficiente de compensação do fator de reatividade é dado por:

$$k_r = \frac{\lambda_Q}{\lambda_Q^*} \sqrt{\frac{1 - \lambda_Q^{*2}}{1 - \lambda_Q^2}} \quad (20)$$

Similarmente, dado um valor específico para o fator de reatividade, λ_Q^* , que atenda a norma, por exemplo, $\lambda_Q^* = 0,92$, o coeficiente para atingir este valor, resulta: $k_r = 0,426 \sqrt{\lambda_Q^2 / (1 - \lambda_Q^2)}$. Neste caso, a faixa de valores de λ_Q^* é compreendida entre λ_Q e 1.

Por conseguinte, utilizando (20) e (13) pode ser definida a corrente de referência para o CEP que garanta uma compensação parcial ou total do fator de reatividade. Note-se que, quando λ_Q^* é ajustado em 1 ($\lambda_Q^* = 1$), o coeficiente k_r resulta zero ($k_r = 0$). Neste caso, a corrente de referência para o CEP resulta igual à corrente reativa ($i_{ref} = i_r$). Isso significa que o CEP compensa todo o fator de reatividade resultando corrente em fase com a tensão no PAC.

3) *Compensação do fator de potência* - De forma semelhante, o coeficiente para o fator de potência resulta em:

$$k_{na} = \frac{\lambda}{\lambda^*} \sqrt{\frac{1 - \lambda^{*2}}{1 - \lambda^2}} \quad (21)$$

Utilizando (21) e (13), também pode ser ajustada a corrente de referência para o CEP que leva a uma compensação parcial ou total do fator de potência. Observe que, quando $\lambda^* = 1$, o seu coeficiente é nulo ($k_{na} = 0$). Neste caso, a corrente de referência resulta igual à corrente não ativa ($i_{ref} = i_{na}$). Isso significa que o CEP compensa todos os distúrbios da carga, resultando em uma corrente pela rede em fase e com a mesma forma de onda da tensão no PAC.

Quaisquer fatores de conformidade da carga, isto é, componentes de corrente indesejadas, definidos anteriormente, podem ser aplicados à estratégia de controle de um FAP para minimizar individualmente ou até mesmo, eliminar todos os distúrbios de QEE. No entanto, este tipo de aplicação pode resultar em custos adicionais tornando a solução financeiramente cara. Embora o objetivo da compensação seja eliminar as componentes indesejadas da corrente, mantendo no PAC apenas a componente ativa, torna-se desejável uma estratégia de controle que seja capaz de obter um subconjunto de sinais de referência que possibilitem o funcionamento pleno do CEP, tal que determinados distúrbios possam ser compensados de forma independente para manter valores aceitáveis de determinados indicadores de QEE com uma relação custo-benefício otimizada.

Além disso, os objetivos de QEE podem mudar ao longo do tempo, principalmente em ambientes de microrredes onde a energia proveniente das fontes renováveis (solar ou eólica) apresenta características intermitentes.

Portanto, a fim de proporcionar uma estratégia de controle flexível online, o sinal de referência que contém qualquer porcentagem das componentes ortogonais indesejadas, de (13), pode ser expresso como uma função de diferentes coeficientes de compensação, tal como:

$$i_{ref} = i_r(1 - k_r) + i_v(1 - k_v) = i_{na}(1 - k_{na}) \quad (22)$$

Assim, o sinal de referência definido em (22) possibilita a operação do CEP com uma estratégia de compensação adaptável, extraíndo as componentes indesejadas da corrente de forma flexível, onde podem ser selecionadas as componentes e a porcentagem de compensação que deve ser aplicada a cada uma destas componentes.

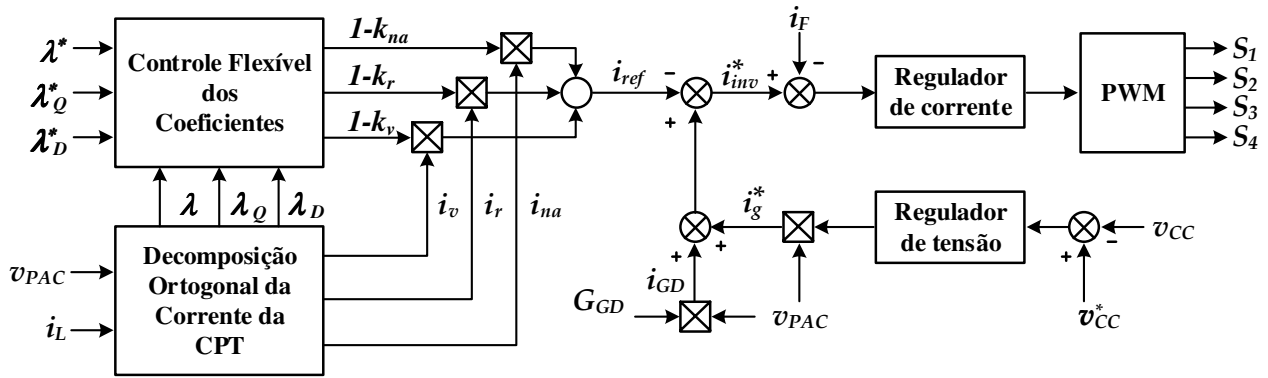


Fig. 3. Diagrama de blocos funcionais do controle flexível proposto.

B. Geração da Referência de Corrente para Fontes de Energia

Neste caso, a injeção de potência ativa é realizada conforme (2), onde a corrente relacionada com a fonte de energia local, que deve ser injetada na rede, é determinada mediante a condutância equivalente, G_{GD} , a qual é dada por:

$$G_{GD} = \frac{P_{GD}}{V^2} \quad (23)$$

onde, P_{GD} é o fluxo de potência ativa disponível na fonte de energia local, a ser garantido pelo controle de corrente do CEP. Assim, a corrente instantânea de referência pode ser calculada conforme (24). Sendo que, i_{GD} representa a corrente instantânea que deve ser injetada na rede para transferir a energia disponível na fonte local.

$$i_{GD} = v \cdot G_{GD} \quad (24)$$

Em geral, a forma de onda de i_{GD} pode ser definida usando a tensão instantânea no PAC ou a sua componente fundamental, configurando injeção de corrente resistiva ou corrente senoidal respectivamente. Sob determinadas condições de tensão, os resultados obtidos com cada uma destas estratégias podem ser diferentes.

O diagrama simplificado usando blocos funcionais do sistema de controle flexível proposto é mostrado na Figura 3. Tal estrutura de controle é aplicada ao sistema da Figura 4. Inicialmente, conforme a Figura 3, a decomposição da corrente absorvida no PAC, em componentes ortogonais, é determinada de acordo com (2)-(6) e os fatores de conformidades da carga através de (8), (9) e (11). Em seguida, as referências para os fatores de conformidade λ_Q^* , λ_D^* , ou λ^* são ajustados pelo sistema supervisor de controle de forma a obter o sinal de referência que garanta, por exemplo, limites adequados de indicadores de QEE no PAC ou extrair a capacidade remanescente do CEP durante a injeção de potência ativa na rede elétrica para compensar eventuais correntes indesejadas da carga.

A referência de corrente (i_g^*) necessária para manter constante a tensão do barramento CC é gerada multiplicando a tensão normalizada da rede pela corrente de pico oriunda do regulador de tensão. Por conseguinte, o CEP sintetiza uma corrente, i_{inv}^* que é a soma da corrente ativa a ser injetada (i_{GD}), da corrente i_g^* , e da corrente indesejada da carga a ser compensada (i_{ref}), tal como:

$$i_{inv}^* = i_{GD} + i_g^* - i_{ref}. \quad (25)$$

Finalmente a corrente, i_{inv}^* é direcionada para o controlador de corrente do CEP. Assim, a energia gerada pela fonte de energia local é automaticamente injetada na rede mediante o controle da tensão do barramento CC. O CEP atua como um retificador controlado de alto fator de potência durante condições transitórias de carga e, em regime permanente, como um compensador de corrente. Portanto, a estratégia proposta pode ser usada facilmente como uma ferramenta para o controle de CEPs ligados à rede elétrica.

V. MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE

O CEP monofásico conectado à rede discutido neste trabalho está exposto na Figura 1. A Figura 4 traz os detalhes desta topologia e os valores dos parâmetros utilizados são mostrados na Tabela I.

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 e a outra malha é mais lenta, responsável por manter constante a tensão no barramento CC. Uma malha adicional controla a injeção de corrente da fonte de energia local no barramento CC.

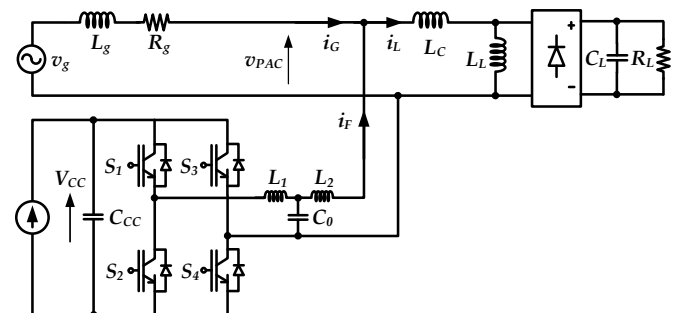


Fig. 4. Circuito utilizado para avaliar a metodologia proposta para controle flexível do CEP.

TABELA I

Parâmetros do Sistema

$L_1 = L_2$	0,5 mH	L_C	1 mH
$R_1 = R_2$	100 mΩ	L_L	70 mH
C_o	3 uF	C_L	470 uF
R_o	10 mΩ	R_L	70 Ω
C_{CC}	1 mF	L_g	2 mH
V_{CC}	300 V	R_g	200 mΩ
T_s	38 us	V_g	127V/60Hz

A. Estágio de Saída do CEP

Como mostrado na Figura 4, o estágio de saída do CEP é composto por um filtro LCL, o qual apresenta um ganho elevado na frequência de ressonância, podendo causar problemas de instabilidade e oscilações. A mitigação desse problema pode ser realizada pela inserção de uma resistência em série com o capacitor.

Embora a técnica seja muito simples, uma parte da energia gerada seria dissipada no resistor, diminuindo a eficiência global do sistema. Assim, um método simples é emular uma resistência virtual ao invés de usar um resistor de potência [26]-[28]. Por outro lado, a necessidade de um sensor adicional para medir a corrente do capacitor é a desvantagem deste método. A Figura 5 mostra o circuito equivalente do filtro LCL.

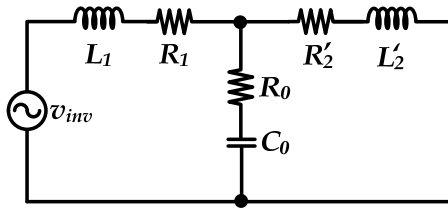


Fig. 5. Circuito equivalente do filtro LCL.

A frequência de ressonância do filtro LCL é dada por:

$$\omega_{cLCL} = \sqrt{\frac{1}{\frac{L_1 L'_2}{L_1 + L'_2} C_0}} \quad (26)$$

onde:

$$\begin{aligned} L'_2 &= L_2 + L_g \\ R'_2 &= R_2 + R_g \end{aligned} \quad (27)$$

sendo L_g e R_g a indutância e a resistência da rede, respectivamente.

A função de transferência referente à corrente que flui através do indutor de saída do filtro e a tensão produzida pelo CEP é dada por (28). O amortecimento da ressonância pode ser alcançado através da adição da corrente que flui pelo capacitor, ponderada por um fator de amortecimento K_D , à tensão de referência do conversor [26], resultando em (29). O amortecimento crítico é conseguido para $K_D = 0,5$. A Figura 6 mostra o diagrama de blocos usado para projetar o controlador da malha de corrente.

A função de transferência da malha aberta $G_{MA}(s)$, mostrada em (30), é obtida considerando o atraso devido ao modulador PWM, $G_{PWM}(s)$, conforme (31). Uma vez que o controlador deve ser implementado em uma plataforma digital, o atraso devido ao tempo de processamento do algoritmo de controle, $G_d(s)$, deve ser considerado (32). O filtro anti-aliasing, $G_a(s)$, colocado na entrada do conversor analógico-digital é modelado por (33).

$$G_{MA}(s) = K_{inv} K_{SI} G_{FD}(s) G_{PWM}(s) G_d(s) G_a(s) \quad (30)$$

$$G_{PWM}(s) = \frac{1 - s \frac{1}{4} T_s}{1 + s \frac{1}{4} T_s} \quad (31)$$

$$G_d(s) = \frac{1 - s \frac{1}{2} T_s}{1 + s \frac{1}{2} T_s} \quad (32)$$

$$G_a(s) = \frac{\omega_{c_anti}}{s + \omega_{c_anti}} \quad (33)$$

O ganho do inversor é dado por K_{inv} , K_{IS} é o ganho do sensor de corrente, ω_{c_anti} é a frequência de corte do filtro anti-aliasing e T_s é o período de amostragem que é a metade do período de comutação.

$$G_F(s) = \frac{I_{L_2}(s)}{V_{inv}(s)} = \frac{s C_0 R_0 + 1}{s^3 L_1 L'_2 C_0 + s^2 C_0 (L_1 R'_2 + L'_2 R_1 + L_1 R_0 + L'_2 R_0) + s C_0 (L_1 + L'_2 + R_1 R'_2 + R_1 R_0 + R'_2 R_0) + R_1 + R'_2} \quad (28)$$

$$G_{FD}(s) = \frac{I_{L_2}(s)}{V_{inv}(s)} = \frac{s C_0 R_0 + 1}{s^3 L_1 L'_2 C_0 + s^2 C_0 (K_D L'_2 + L_1 R'_2 + L'_2 R_1 + L_1 R_0 + L'_2 R_0) + s (K_D R'_2 C_0 + L_1 + L'_2 + R_1 R'_2 C_0 + R_1 R_0 C_0 + R'_2 R_0 C_0) + R_1 + R'_2} \quad (29)$$

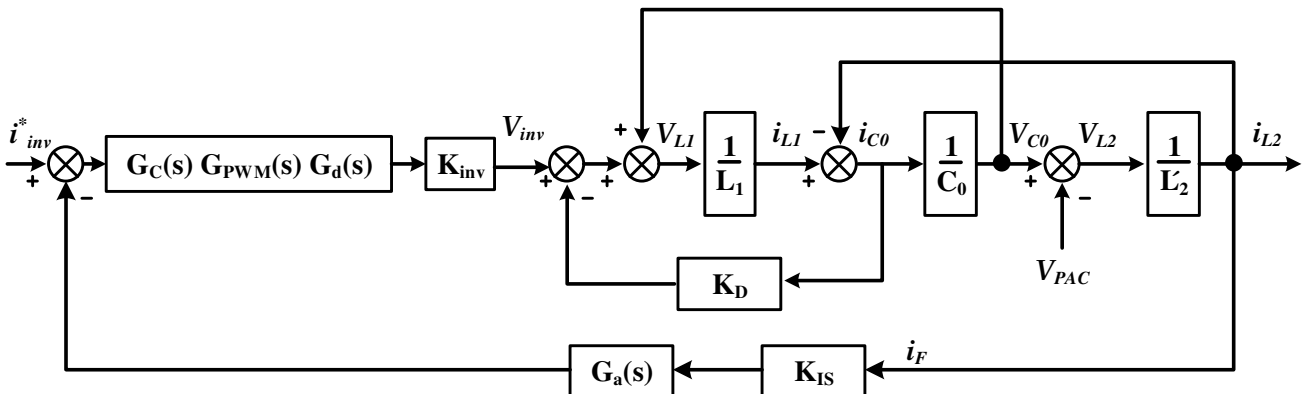


Fig. 6. Diagrama de blocos da malha de corrente.

O controlador de corrente $G_C(s)$ baseia-se no controlador proporcional mais um controlador ressonante harmônico [29], [30], dado por:

$$G_C(s) = K_C + \sum_{h=1,3,5,\dots,15} \frac{2K_{IPR} \omega_{CPR} s}{s^2 + 2\omega_{CPR} s + (h\omega_o)^2} \cdot \quad (34)$$

A ordem harmônica a ser compensada é representada por h , ω_o é a frequência fundamental da rede e K_C , K_{IPR} e ω_{CPR} representam o ganho proporcional, o ganho integral e a banda passante do controlador ressonante, respectivamente. O valor de K_{IPR} é escolhido de forma a produzir um alto ganho nas frequências harmônicas e ω_{CPR} deve ser projetado de forma a manter um compromisso entre a seletividade das harmônicas compensadas e a tolerância em relação ao desvio da frequência nominal da rede.

O controlador de corrente é projetado considerando que, abaixo da frequência de ressonância, $G_{MA}(s)$ se comporta como uma indutância. Assim, em tais frequências, o filtro LCL pode ser simplificado em uma indutância total dada por:

$$L_T = L_1 + L'_2. \quad (35)$$

Portanto, o ganho proporcional do controlador $G_C(s)$ é calculado por:

$$K_C = \frac{\omega_{CL} L_T}{K_{inv} K_{IS}}. \quad (36)$$

A equação (36) produz valores aceitáveis para K_C desde que a resistência do indutor seja menor do que a sua reatância na frequência ω_{CL} (frequência de corte da malha fechada de corrente), que determina a frequência de cruzamento, ou banda passante, desejada para o sistema de compensação.

A Tabela II mostra os parâmetros utilizados no controlador de corrente e a Figura 7 mostra a resposta em frequência da função de transferência de malha aberta, $G_{MA}(s)$, antes e após a compensação com $G_C(s)$. A margem de fase é de aproximadamente 45° e a margem de ganho é de 6 dB. A banda passante da malha de corrente é de 1 kHz.

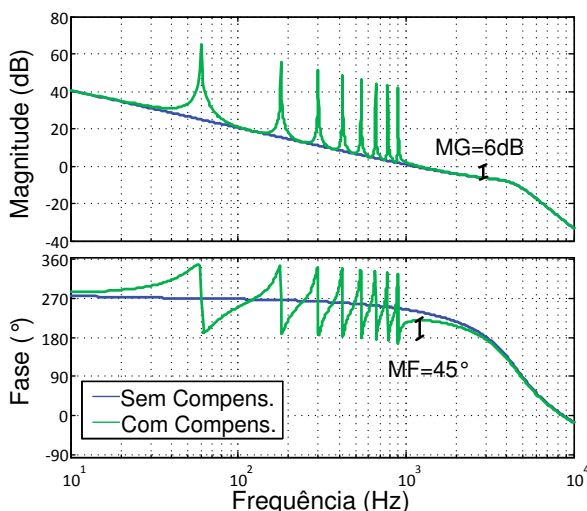


Fig. 7. Resposta em frequência da função de transferência do laço aberto do controlador de corrente.

TABELA II
Parâmetros do Controlador de Corrente

K_{inv}	300	K_C	0,95
K_{IS}	0,0667	K_{IPR}	100
ω_{CL}	6,28 [krad/s]	$\omega_{c anti}$	62,8 [krad/s]
ω_{CPR}	5 [rad/s]	ω_o	377 [rad/s]
T_s		38 [μs]	

B. Consideração Sobre a Variação da Indutância da Rede

Conforme se observa na Figura 4, a rede apresenta uma indutância (L_g) e resistência (R_g), cujos valores, geralmente, são desconhecidos. Segundo (27) e (29), estes parâmetros afetam o comportamento dinâmico do sistema, afetando, inclusive, a estabilidade. Assim, para avaliar o efeito destes parâmetros na estabilidade do sistema foi gerada a Figura 8, que mostra a posição dos principais polos do sistema em malha fechada para diferentes valores de L_g . A Figura 8 é obtida pela aplicação de realimentação unitária à função de transferência de malha aberta, (30), do sistema de controle de corrente, já compensado utilizando os parâmetros mostrados na Tabela I e na Tabela II.

Nota-se que, conforme a indutância da rede diminui, os pólos se aproximam do eixo imaginário, o que tende a diminuir o amortecimento do sistema e aumentar as oscilações. Para $L_g < 0,25mH$ o sistema torna-se instável, pois os pólos passam a estar localizados no lado direito do plano complexo.

A robustez do sistema pode ser melhorada se a indutância L_2 do filtro LCL for aumentada. No entanto, tal modificação pode ser evitada, uma vez que, o sistema torna-se instável apenas quando a rede apresenta uma indutância consideravelmente baixa.

O impacto de R_g na estabilidade é mínimo, pois todo o amortecimento necessário é provido pela resistência virtual e, caso a resistência R_g aumentar, o sistema se tornará ainda mais amortecido.

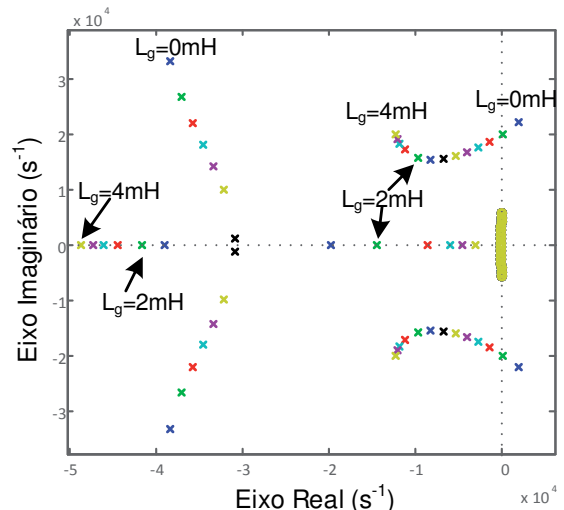


Fig. 8. Pólos do sistema em malha fechada considerando variação de L_g .

C. Barramento CC

O controle do barramento CC é responsável por manter o balanço de potência entre a potência que é entregue ao

sistema na saída do conversor e a potência no barramento CC, mesmo quando o conversor atua apenas como um FAP. A Figura 9 mostra o diagrama de blocos do controle em malha fechada da tensão do barramento CC, onde é incluído o ganho da malha de controle de corrente, $1/K_{IS}$, conforme [31].

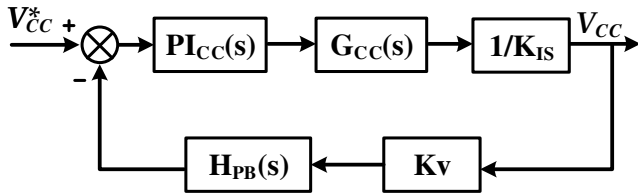


Fig. 9. Controle da tensão no barramento CC.

A função de transferência, $G_{CC}(s)$ é obtida através de uma análise de pequenos sinais e relaciona a tensão do barramento CC e a corrente de pico na saída do conversor, expressa por:

$$G_{CC}(s) = \frac{\tilde{v}_{CC}(s)}{\tilde{i}_{rp}(s)} = \frac{V_{CC}}{s\sqrt{2}C_{CC}V_{CC}^*}. \quad (37)$$

Conforme [10], [31], o compensador, $PI_{CC}(s)$ que produz o pico de corrente de referência para o conversor, é dado por:

$$PI_{CC}(s) = K_P + \frac{K_I}{s}. \quad (38)$$

Este controlador deve resultar em uma banda passante suficientemente estreita, evitando oscilações no valor de pico da referência de corrente e minimizando a interação com o controlador rápido de corrente, que tem uma banda passante maior [31], [32].

O filtro passa-baixas, $H_{PB}(s)$, mostrado em (39), é projetado para atenuar a ondulação de 120 Hz presente na tensão V_{CC} . Neste trabalho, foi considerada uma frequência de corte (ω_{CPB}) igual a 30 Hz.

$$H_{PB}(s) = \frac{\omega_{CPB}}{s + \omega_{CPB}} \quad (39)$$

Finalmente, a função de transferência em malha fechada pode ser expressa por:

$$H_{CCMF}(s) = \frac{G_{CC}(s)PI_{CC}(s)\frac{1}{K_{IS}}}{1 + PI_{CC}(s)G_{CC}(s)H_{PB}(s)K_V}. \quad (40)$$

A Figura 10 mostra a função de transferência da malha de tensão do barramento CC com e sem o compensador PI. A banda passante foi ajustada em 7 Hz, e a margem de fase foi ajustada em 70° a fim de se obter um sistema compensado com baixo overshoot, resultando em um compensador PI com $K_P = 2,2$ e $K_I = 49$. A tensão de pico da rede é 180 V, a tensão de referência para o barramento CC (V_{CC}^*) é 300 V e o ganho do sensor de tensão do barramento CC é $K_V = 0,00333$.

VI. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A fim de validar a estratégia de controle flexível proposta para o CEP, o circuito mostrado na Figura 4 foi simulado

utilizando o software PSIM. A carga conectada ao PAC consiste de indutores (carga linear) para gerar potência reativa, e um retificador monofásico para gerar correntes distorcidas. Um CEP multifuncional foi usado para demonstrar a flexibilidade da estratégia de controle proposta, não apenas para minimização de distúrbios, mas também para injetar energia na rede. O valor RMS da tensão nominal da fonte de alimentação é 127 V com 2% de 5ª harmônica. Os detalhes adicionais dos parâmetros do sistema simulado podem também ser encontrados na Tabela I.

O objetivo desta simulação é mostrar a eficácia do método para atingir valores preestabelecidos de fator de distorção e fator de reatividade, visando, por exemplo, atender a limites preestabelecidos por normas de QEE. Neste sentido, o CEP deverá funcionar apenas como FAP. Por questão de simplicidade e, principalmente, para verificar a exatidão do controle flexível, o FAP foi representado por uma fonte de corrente controlada ideal. A dinâmica de operação do sistema é descrita fazendo referência à tensão, corrente, parcelas de corrente e fatores de conformidade da carga conectada ao PAC.

A operação do sistema é analisada, em um primeiro cenário, sem qualquer tipo de compensação ($t < 0,5s$). Em $t = 0,5s$, o CEP é ligado para compensar apenas uma porcentagem do fator de distorção ($\lambda_D^* = 0,1$) e em $t = 0,65s$ a corrente de referência é reajustada para compensar todo o fator de distorção ($\lambda_D^* = 0$). Em $t = 0,8s$ o centro de controle adiciona a compensação de uma porcentagem do fator de reatividade ($\lambda_Q^* = 0,92$) e finalmente em $t = 0,95s$ a corrente de referência é reajustada para compensar a corrente reativa remanescente ($\lambda_Q^* = 1$). Neste instante o CEP compensa todos os distúrbios da carga resultando em fator de potência unitário.

A referência para os fatores de conformidade é ajustada externamente, o que na prática poderia ser realizado por uma central que pode monitorar a operação de vários CEPs simultaneamente de forma online. As Figuras 11 e 12 mostram a resposta dinâmica do CEP para os diferentes objetivos de compensação apresentados anteriormente.

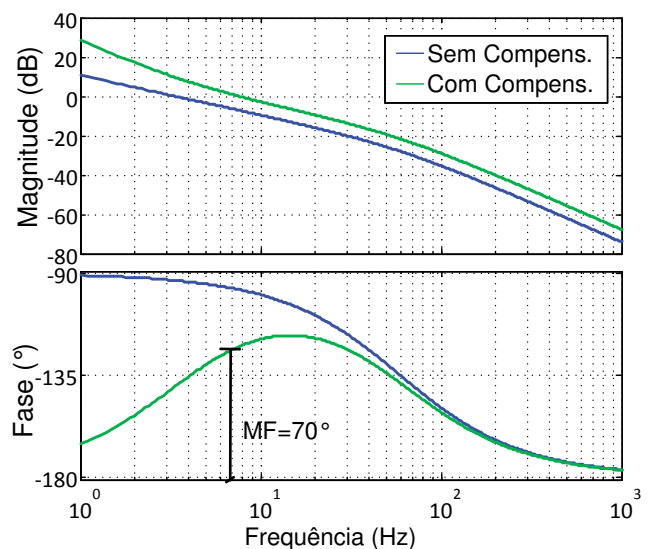


Fig. 10. Diagrama de bode da função de transferência do barramento CC antes e depois da compensação PI.

1) CEP desligado ($t < 0,5s$) - Inicialmente, podemos observar pela Figura 12 que a corrente no PAC está altamente distorcida, devido à carga não linear (retificador), e apresenta uma defasagem considerável em relação à tensão, devida à carga linear (indutores). A Figura 11 mostra o comportamento do fator de potência, fator de distorção e fator de reatividade. Inicialmente, o fator de distorção é alto devido às harmônicas de corrente, o fator de reatividade é baixo devido a potência reativa da carga resultando em um fator de potência muito baixo. Isto também pode ser verificado pelos altos valores das parcelas de corrente, reativa (i_{Gr}) e residual (i_{Gv}) na Figura 12. Além disso, a tensão de alimentação é ligeiramente distorcida. Neste período todos os coeficientes de compensação são iguais à unidade ($k_r = 1 = k_v$).

2) CEP compensando apenas as harmônicas ($0,5s < t < 0,8s$) - Neste caso, o CEP foi ajustado para chavar de um estado inativo para atingir valores específicos de fator de distorção mantendo constante o fator de reatividade. Assim o centro de controle, em $t = 0,5s$ muda o valor do coeficiente de compensação k_v de 1 para 0,159 e finalmente em $t = 0,65s$ muda de 0,159 para 0. Como o objetivo é apenas compensar as harmônicas, o coeficiente de reatividade k_r é mantido unitário, isto é, sem compensação de reativos.

A Figura 11 mostra o comportamento do fator de distorção no PAC. Como esperado, a primeira intervenção do CEP reduz o fator de distorção de 0,4896 para 0,1 e depois de um intervalo de tempo ($t > 0,65s$) compensa as correntes harmônicas remanescentes, resultando em fator de distorção nulo ($\lambda_D = 0$).

A Figura 12 mostra o comportamento da corrente residual (i_{Gv}), observa-se que, para $k_v = 0,159$, a corrente harmônica (i_{Gv}) é compensada parcialmente e para $k_v = 0$ é totalmente compensada. Porém, a defasagem entre a tensão e a corrente se mantém constante, pois não foram compensados os reativos da carga.

3) CEP compensando as harmônicas mais os reativos ($t > 0,8s$) - O centro de controle mantém constante o valor do coeficiente de compensação harmônica ($k_v = 0$), isto é, compensação total de harmônicos. Em $t = 0,8s$ o coeficiente de compensação de reativos, k_r , muda de 1 para 0,3673 e seguidamente em $t = 0,95s$ muda de 0,3673 para 0.

A Figura 11 mostra o comportamento do fator de reatividade no PAC. Como esperado o fator de reatividade aumenta de 0,6531 para 0,92 e depois de um intervalo de tempo ($t > 0,95s$) o fator de reatividade é ajustado para unidade ($\lambda_Q = 1$), resultando em fator de potência unitário $\lambda = 1$.

Observa-se que, no primeiro intervalo os reativos são compensados parcialmente, resultando em uma diminuição na defasagem entre a tensão e a corrente e na amplitude da corrente reativa. Finalmente todas as parcelas indesejadas são compensadas, resultando em corrente senoidal e em fase com a tensão no PAC.

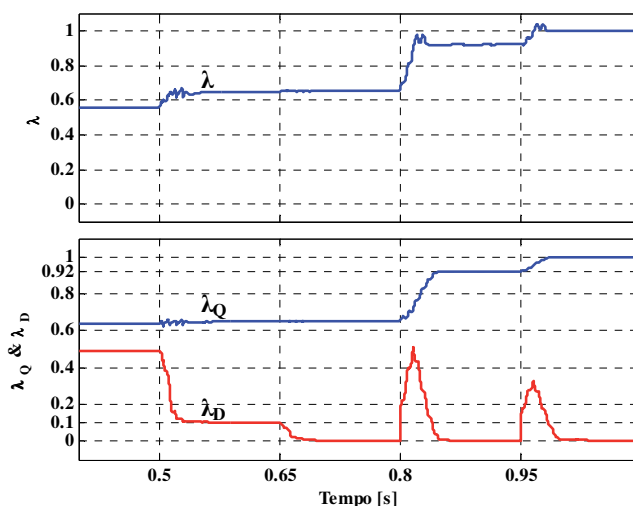


Fig. 11. Resposta dinâmica do controle flexível proposto para diferentes objetivos de compensação.

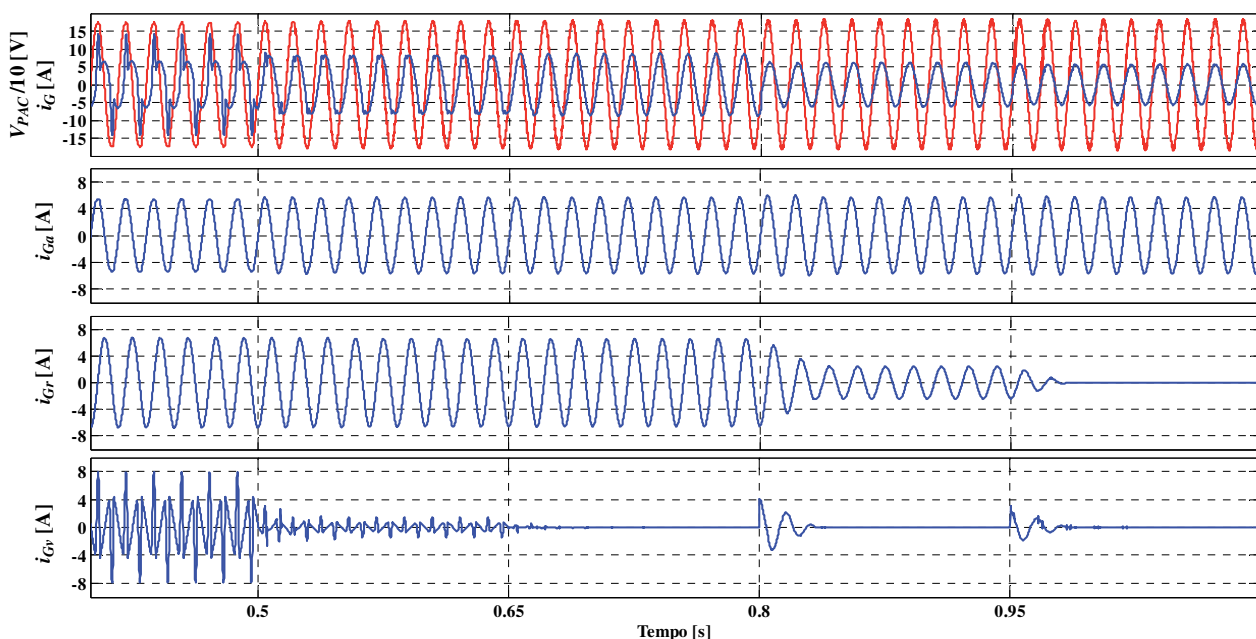


Fig. 12. Resposta dinâmica do controle flexível proposto para diferentes objetivos de compensação. Comportamento das formas de onda da tensão $v_{PAC}(t)/10$, corrente total no PAC $i_G(t)$, corrente ativa $i_{Ga}(t)$, corrente reativa $i_{Gr}(t)$ e corrente residual $i_{Gv}(t)$.

VII. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Como o intuito de validação experimental do controle flexível proposto, e assumindo o mesmo circuito mostrado na Figura 4, um protótipo de CEP multifuncional foi implementado e testado. Os algoritmos de controle e geração de referência foram implementados em um DSP ponto flutuante TMS320F28335 com *clock* de 150 MHz. 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 IGBTs são chaveados a uma frequência de 13 kHz.

A dinâmica de operação do sistema é descrita pela análise da tensão e corrente nos diferentes pontos de medição (v_{PAC} , i_G e i_F). Neste caso a tensão de alimentação é a rede elétrica (127 V, 60 Hz).

Como o objetivo é o uso multifuncional do CEP, a dinâmica e a capacidade de compensação flexível do sistema proposto é analisada considerando dois modos de operação: CEP operando apenas como FAP e operação simultânea como FAP e IEP. Para efeitos de compensação é considerada a compensação flexível do fator de potência (λ^*) de modo a garantir que o CEP atue sempre dentro de sua capacidade nominal.

A Figura 13 mostra as formas de onda da tensão no PAC, corrente na rede e corrente do CEP na condição inicial (CEP desligado). Observa-se que a distorção de corrente na rede é alta ($DHT_I = 30\%$) e a defasagem com relação à tensão é considerável. Além disso, a distorção de tensão é apreciável ($DHT_V = 5\%$).

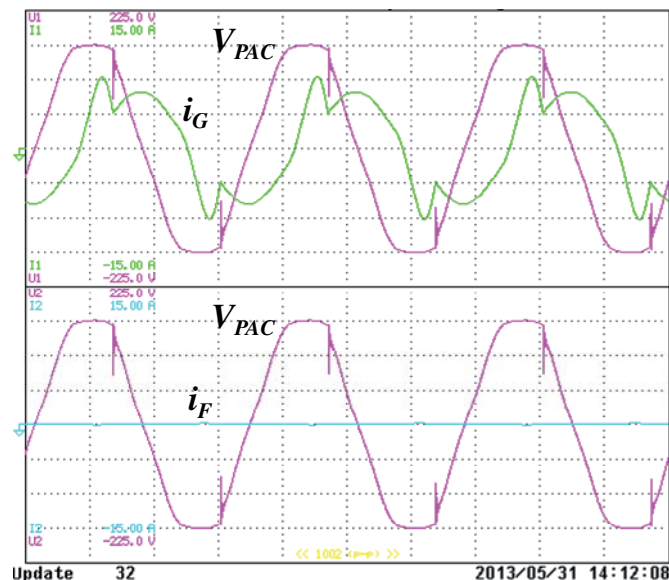


Fig. 13. CEP desligado. Superior: tensão (v_{PAC}) e corrente na rede (i_G). Inferior: tensão (v_{PAC}) e corrente no CEP (i_F).

1) *Operação como FAP* - Neste modo de operação o CEP atua apenas para compensar as correntes indesejadas da carga, sem injetar potência ativa na rede. Para isto, o centro de controle ajusta os coeficientes de compensação para

produzir correntes de referência para duas situações diferentes. Na primeira situação ocorre a compensação total dos distúrbios de corrente. Na segunda situação a compensação é parcial. Em resumo, o fator de potência de referência (λ^*) varia de 1 para 0,95.

A Figura 14 mostra a tensão no PAC, a corrente na rede e a corrente no CEP considerando operação apenas como FAP. Observa-se que, na primeira etapa de compensação (Figura 14.a), como esperado, o CEP compensa todos os distúrbios da carga. As correntes compensadas são praticamente senoidais ($DHT_I = 4,5\%$) e estão em fase com a tensão, tal como no caso de uma carga puramente resistiva ($\lambda^* = \lambda_G = 0,9985$). Além disso, pode-se observar que os distúrbios associados à tensão também são minimizados ($DHT_V = 2,9\%$), uma vez que a maior parte da distorção da tensão no PAC era imposta pela carga. Neste caso, o valor ajustado do coeficiente de compensação é nulo ($k_{na} = 0$), isto é, compensação total de distúrbios.

Da Figura 14.b, observa-se que, para compensação parcial, diferentemente da primeira etapa de compensação (Figura 14.a), a distorção da corrente aumentou ($DHT_I = 9,6$), bem como a defasagem em relação à tensão. Isto é devido à mudança do parâmetro k_{na} de 0 para 0,1392. O fator de potência obtido na etapa de compensação parcial é aproximadamente igual a referência, ajustada pela central de controle ($\lambda^* \approx \lambda_G \approx 0,95$). Neste caso, o incremento no valor da distorção de corrente faz com que a distorção de tensão no ponto de acoplamento aumente ligeiramente ($DHT_V = 3,2\%$).

2) *Operação simultânea como IEP e FAP* - Quando a fonte de corrente (I_{CC}) é ligada no barramento CC, o CEP começa a operar como um conversor multifuncional, ou seja, injetando potência, oriunda da fonte local, na rede e compensando as correntes indesejadas da carga. Neste cenário, a fonte de corrente injeta 2 A no barramento CC, fornecendo um total de 600 W de potência. Neste caso, o centro de controle mantém a estratégia de compensação para as duas situações ($\lambda^* = 1$ e $\lambda^* = 0,95$). Da Figura 15 e Tabela III, pode-se observar que, a injeção da potência ativa não afeta o desempenho do CEP na estratégia de compensação flexível.

TABELA III
CEP Operando como IEP e FAP

	λ_G	THD_I [%]	THD_V [%]
Situação I	0,9987	6,5	2,5
Situação II	$\approx 0,95$	10,7	2,7

Portanto, é possível, além de injetar corrente ativa (potência ativa) na rede, obter uma compensação parcial das correntes indesejadas da carga com um bom desempenho do CEP. Além disso, dependendo da capacidade de potência disponível no CEP, o centro de controle pode ajustar online o coeficiente de compensação de forma a não ultrapassar a capacidade do CEP. Assim a potência processada pelo CEP sempre será menor do que a potência nominal, contribuindo com a segurança e preservando a vida útil do CEP.

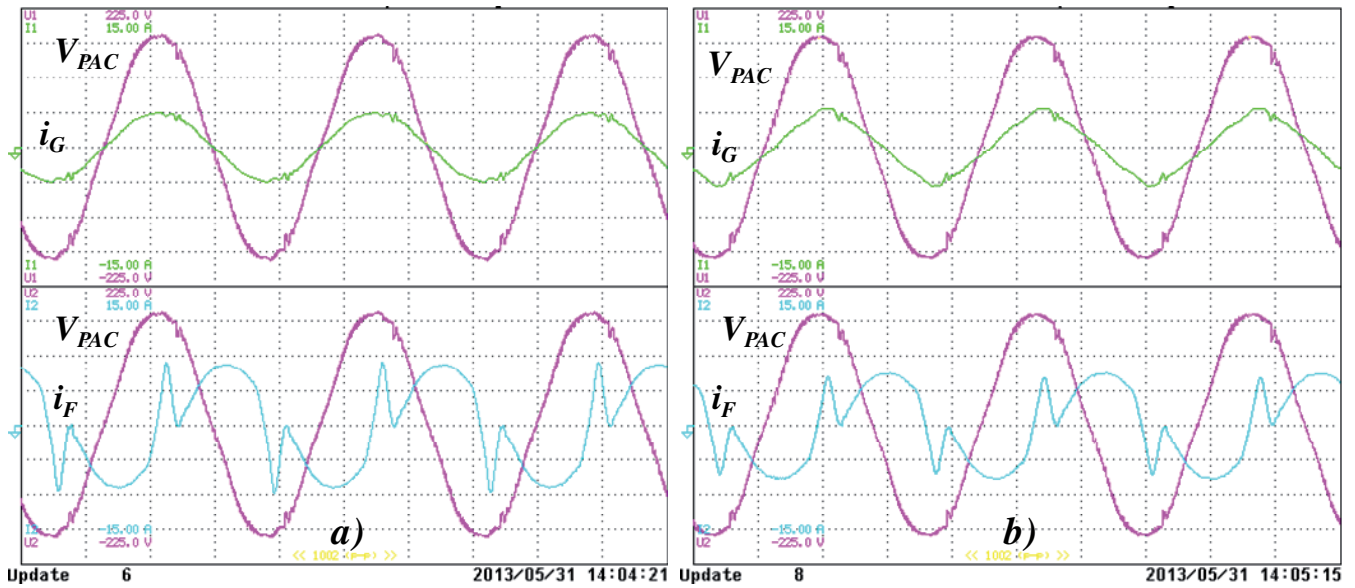


Fig. 14. CEP operando como FAP e realizado compensação de correntes não ativas (i_{na}) com referência de fator de potência (λ^*) alterada de 1,0 (a) para 0,95 (b). Superior: tensão (v_{PAC}) e corrente na rede (i_G). Inferior: tensão (v_{PAC}) e corrente no CEP (i_F).

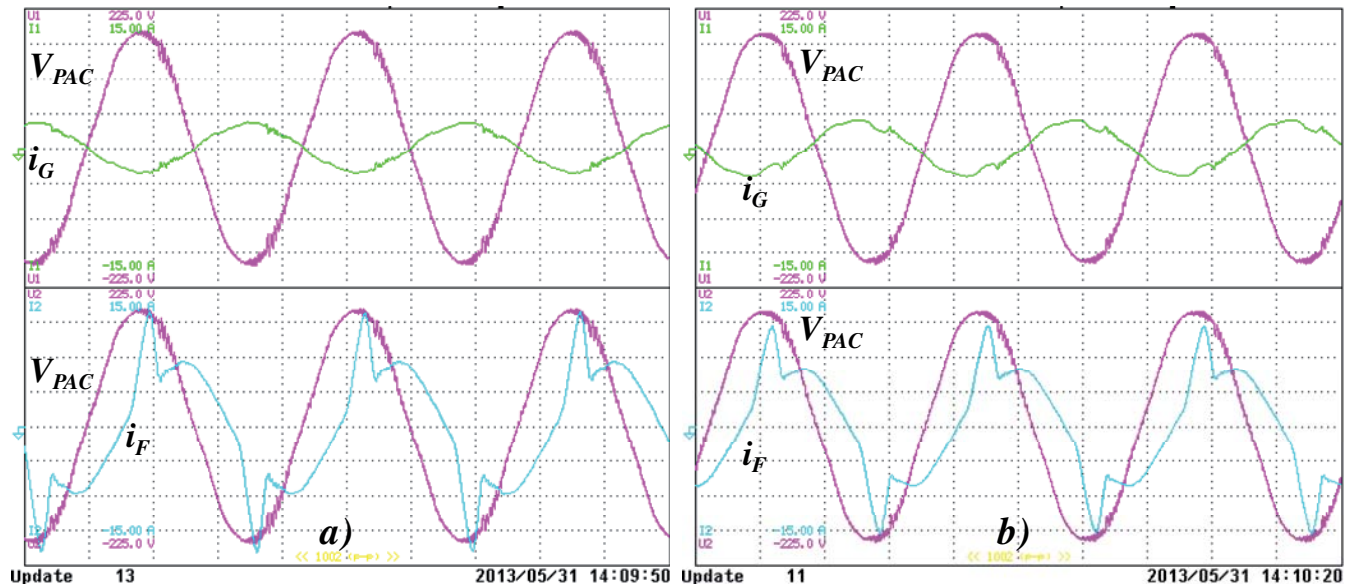


Fig. 15. CEP injetando potência na rede (IEP) e aplicando uma compensação (FAP) de corrente não ativa (i_{na}) com referência de fator de potência (λ^*) alterada de 1,0 (a) para 0,95 (b). Superior: tensão (v_{PAC}) e corrente na rede (i_G). Inferior: tensão (v_{PAC}) e corrente no CEP (i_F).

Este fato pode ser verificado na Figura 16, onde observa-se que a potência aparente do CEP, após o ajuste do coeficiente de compensação k_{na} de 1 para 0,1392, diminui, fazendo com que o CEP opere dentro de sua capacidade nominal. A potência ativa e a potência aparente da carga são 250 W e 600 VA, respectivamente.

Finalmente com o objetivo de avaliar a resposta dinâmica do sistema, foi imposto um degrau de referência no barramento de CC de 250 V para 300 V. Além disso, a resposta do barramento CC também é avaliada durante a mudança da estratégia de compensação (fator de potência, $\lambda^* = 1$ para $\lambda^* = 0,95$). Da Figura 17, verifica-se que, apesar da resposta dinâmica relativamente lenta da tensão do barramento CC, a resposta do sistema de geração da referência e dos controladores de corrente é mais rápida, levando à convergência do sistema de compensação.

VIII. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma abordagem geral para o uso multifuncional de CEP atuando em microrredes de energia. O controle flexível permite a utilização efetiva da capacidade do conversor e dos recursos energéticos quando o CEP opera, simultaneamente, como filtro ativo e interface com a rede elétrica. A abordagem faz uso da Teoria de Potência Conservativa (CPT) para definir os sinais de referência por meio da utilização de componentes ortogonais de corrente e dos fatores de conformidade da carga. Além disso, o trabalho mostra que a CPT oferece uma plataforma interessante para analisar os fenômenos de potência e problemas de QEE nas microrredes de energia, onde as distorções de tensão podem ser consideráveis. A aplicação da CPT para alcançar objetivos específicos de compensação também foi abordada,

mostrando que a teoria é aplicável para todo tipo de operação (FAP e IEP) e pode ser a base para o controle cooperativo de CEPs distribuídos em microrredes inteligentes.

A abordagem de controle flexível foi testada experimentalmente e por simulação, demonstrando sua efetividade em um cenário de interesse prático. Foi mostrado que, mesmo utilizando o CEP de forma multifuncional, isto é, injetando potência na rede e compensando distúrbios de QEE simultaneamente, é possível obter fator de potência praticamente unitário e baixas distorções de tensão no PAC e de corrente pela rede, respeitando a capacidade de potência do CEP e normas e recomendações nacionais e internacionais, tais como IEC 61000-3-2, IEEE 519 e Prodist Módulo 8.

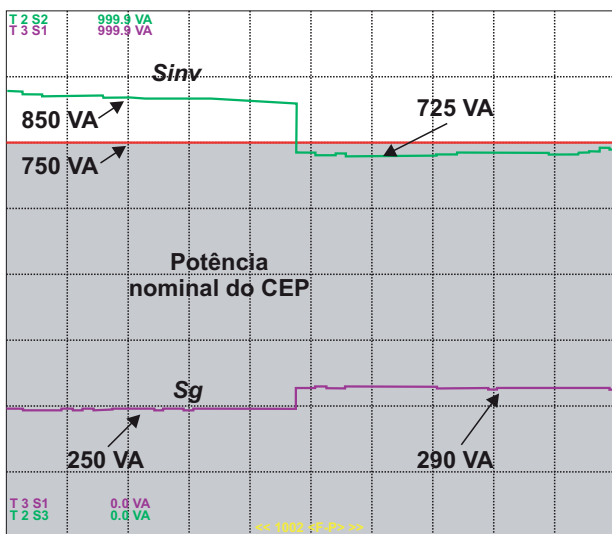


Fig. 16. Variação da potência aparente da rede e do conversor, com referência de fator de potência (λ^*) alterado de 1 para 0,95.

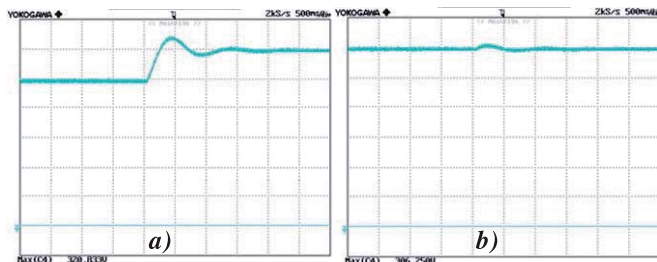


Fig. 17. Comportamento dinâmico da tensão do barramento CC (50 V/div e 500 ms/div): a) degrau de referência (250 V para 300 V); b) referência de fator de potência (λ^*) alterada de 1 para 0,95.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

[1] G. Venkataramann, C. Marnay, “A Large Role for Microgrids: Are Microgrids a Viable Paradigm for

Electricity Supply Expansion?” *IEEE power & Energy Magazine*, pp. 78-82, Maio/Junho, 2008.

- [2] C. Marnay, H. Asano, S. Papathanassiou, G. Strbac. “Policymaking for Microgrids: Economic and Regulatory Issues of Microgrid Implementation”, *IEEE Power & Energy Magazine*, pp. 66-77. Maio/Junho, 2008.
- [3] E. Barklund, N. Pogaku, M. Prodanovic, C. Hernandez-Aramburo, T. C. Green, “Energy Management in Autonomous Microgrid Using Stability-Constrained Droop Control of Inverters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, no 5, pp. 2346-2352, Setembro, 2008.
- [4] 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.
- [5] 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-xx, Março, 2007.
- [6] R. Carneletto, 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, Outubro, 2009.
- [7] M. Singh, V. Khadkikar, A. Chandra, R.K. Varma, “Grid Interconnection of Renewable Energy Sources at the Distribution Level With Power-Quality Improvement Features”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.26, no.1, pp. 307-315, Janeiro, 2011.
- [8] 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.
- [9] T. L. Lee, C. T. Lee, P. T. Cheng, “An Autonomous Harmonic Filtering Strategy For Distributed Energy Resources Converters In Microgrid” *Eletrônica de Potência*, vol. 14, no. 14, pp. 233-240, Dezembro, 2009.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] R. Q. Machado, S. Buso, J.A. Pomilio, F. P. Marafao, “Three-phase to single-phase direct connection rural cogeneration systems”, in *Proc. of IEEE APEC*, vol.3, pp. 1547-1553, 2004.

- [14] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components", *IEEE Transactions on Industrial Application*, vol. 20, no. 3, pp. 625-630, Maio/Junho 1984.
- [15] T. E. N. Zuñiga, M. V. Ataíde, J. A. Pomilio, "Filtro Ativo de Potência Sintetizando Cargas Resistivas", *Eletrônica de Potência*, vol. 5, no. 1, pp. 35-42, 2000.
- [16] E. H. Watanabe, H. Akagi, M. Aredes, "Instantaneous p-q Power Theory for Compensating Nonsinusoidal Systems", *Przegląd Elektrotechniczny, (Electrical Review)*, vol. 84, no. 6, pp. 28-37, 2008.
- [17] P. Mattavelli, "A closed-loop Selective Harmonics Compensation for Active Power Filter", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 37, no. 1, pp. 81-89, 2001.
- [18] P. Mattavelli, F. P. Marafão, "Repetitive-Based Control for Selective Harmonic Compensation in Active Power Filters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 05, pp. 1018-1024, 2004.
- [19] L. F. Penello, E. H. Watanabe, "Filtro Ativo de Potência Tipo "shunt" com Seleção da Potência a Ser Compensada", *Revista Controle & Automação*, vol. 04, no.1, pp. 31-37, 1993.
- [20] H. K. M. Paredes, D. I. Brandão, E. V. Liberado, F. P. Marafão, "Compensação Ativa Paralela Baseada na Teoria de Potência Conservativa", *Eletrônica de Potência*, vol 17, no. 1, pp. 409-418, 2012.
- [21] F. P. Marafão, D. I. Brandão, F. A. S. Gonçalves, H. K. M. Paredes, "Decoupled Reference Generator for Shunt Active Filters Using the Conservative Power Theory". *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 24, pp. 522-534, 2013.
- [22] 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.
- [23] H. K. M. Paredes, "Teoria de Potência Conservativa: Uma nova abordagem para o controle cooperativo de condicionadores de energia e considerações sobre atribuição de responsabilidades", Tese de Doutorado, UNICAMP, 2011.
- [24] H. K. M. Paredes, F. P. Marafão, P. Mattavelli and P. Tenti, "Application of Conservative Power Theory to load and line characterization and revenue metering", in *Proc. of IEEE AMPS*, pp. 1-6, Setembro, 2012.
- [25] J. P. Bonaldo, H. K. M. Paredes, J. A. Pomilio, "Flexible Operation of Grid-Tied Single-Phase Power Converter", in *Proc. of COBEP*, 2013. pp. 987-992.
- [26] Y. Tang, P.C. Loh, P. Wang, F.H. Choo, F. Gao, F. Blaabjerg, "Generalized Design of High Performance Shunt Active Power Filter With Output LCL Filter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.59, no.3, pp.1443-1452, Março, 2012.
- [27] D. Dong, T. Thacker; R. Burgos, F. Wang, D. Boroyevich, "On Zero Steady-State Error Voltage Control of Single-Phase PWM Inverters With Different Load Types", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.26, no.11, pp.3285-3297, Novembro, 2011.
- [28] G. Shen; D. Xu, D. Xi, X. Yuan, "An improved control strategy for grid-connected voltage source inverters with a LCL filter", in *Proc. of IEEE APEC*, pp. 19-23, Março, 2006.
- [29] A.G. Yepes, F.D. Freijedo, O. Lopez, J. Doval-Gandoy, "Analysis and Design of Resonant Current Controllers for Voltage-Source Converters by Means of Nyquist Diagrams and Sensitivity Function," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.58, no.11, pp.5231-5250, Novembro, 2011.
- [30] 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.
- [31] R. Curtri, L. Matakas, "Reference currents determination techniques for load unbalance compensation", in *Proc. of COBEP*, pp. 1-xx, 2003.
- [32] P. Mattavelli and S. Buso, *Digital Control in Power Electronics*. 1st ed. Morgan & Claypool Publishers, 2006.

DADOS BIOGRÁFICOS

Jakson Paulo Bonaldo, engenheiro eletricitista (2008) pela Universidade Federal de Mato Grosso, mestre (2010) pela Universidade Estadual de Campinas, onde atualmente é doutorando na área de Eletrônica de Potência. De 2010 a 2011 atuou como engenheiro de tecnologia na Padtec Optical Components and Systems. Desde 2013 é professor assistente na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão. Suas principais áreas de interesse incluem controle digital, conversores eletrônicos para fontes alternativas de energia 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). 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. 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 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) e de Advances in Power Electronics (Hindawi Publ. Co.). 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 de 2007 a 2011 e atualmente é diretor da FEEC.