

CONDICIONADOR UNIFICADO DE QUALIDADE DE ENERGIA MONOFÁSICO-TRIFÁSICO APLICADO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA MRT

Sérgio Augusto Oliveira da Silva, Fernando Alves Negrão
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Cornélio Procópio – PR, Brasil
e-mail: augus@utfpr.edu.br, fernando.alves@unopar.com.br

Resumo – Este trabalho apresenta a validação experimental de um sistema local de distribuição de energia trifásico a quatro fios (3P4W), utilizando uma topologia de condicionador de qualidade de energia unificado (UPQC) monofásica-trifásica denominada UPQC-Mono-Tri. A topologia é indicada para aplicações em áreas rurais ou remotas, nas quais, por razões econômicas, apenas sistemas de distribuição de energia monofásicos com retorno por terra são acessíveis ao consumidor. Uma vez que o uso de cargas trifásicas é crescente nestas áreas, o acesso a um sistema de distribuição trifásico se torna preponderante. Adotando uma estratégia de compensação dual, o UPQC-Mono-Tri proposto é capaz de drenar da rede elétrica monofásica uma corrente senoidal e em fase com a tensão, obtendo-se assim um elevado fator de potência. Além disso, o sistema também é capaz de suprimir harmônicos de tensão da rede, assim como compensar outros distúrbios como, por exemplo, afundamentos de tensão. Desse modo, um sistema 3P4W com tensões reguladas, balanceadas e senoidais com baixos conteúdos harmônicos é disponibilizado para cargas monofásicas e trifásicas. Resultados são apresentados com o objetivo de validar experimentalmente a topologia proposta, bem como avaliar seus desempenhos estáticos e dinâmicos.

Palavras-Chave – Áreas Rurais Remotas, Estratégia de Compensação Dual, Fator de Potência.

SINGLE-TO-THREE-PHASE UNIFIED POWER QUALITY CONDITIONER APPLIED TO SWER ELECTRICAL POWER DISTRIBUTION SYSTEMS

Abstract – This paper presents the experimental validation of a local three-phase four-wire (3P4W) electrical distribution system, using a single-to-three-phase (S-TP) unified power quality conditioner (UPQC) topology, named UPQC-S-TP. The topology is indicated for applications in remote or rural areas, in which, for economic reasons, only single wire earth return networks are available to consumers. Since the use of three-phase loads is increasing in these areas, the access to three-phase systems has become mandatory. Adopting a dual compensation strategy, the proposed UPQC-S-TP is able

of draining from the single-phase power supply a sinusoidal current in phase with the grid voltage, resulting in high power factor. In addition, the system is also able of eliminating harmonics from the grid voltage, as well as compensating for voltage disturbances, such as voltage sags. Thereby, a 3P4W system with regulated, balanced and harmonic free sinusoidal voltages is provided to both single- and three-phase loads. Experimental results are presented with the purpose of validating the proposed topology, as well as evaluating its static and dynamic performances.

Keywords – Dual Compensation Strategy, Power Factor, Rural Remote Areas.

I. INTRODUÇÃO

Em regiões rurais ou remotas no Brasil, bem como em algumas áreas de países como Austrália e Nova Zelândia, por exemplo, sistemas de distribuição Monofásicos com Retorno pela Terra (MRT) têm sido comumente adotados como solução para o fornecimento de energia elétrica. Isto se deve pelo fato da redução de custos na distribuição de energia para atender grandes extensões territoriais com baixas densidades demográficas ser um importante requisito [1]-[5], uma vez que menores custos de instalação e manutenção são alcançados [4], [6].

Outras alternativas são a utilização da distribuição de energia por meio de dois condutores (fase e neutro) sem o retorno pela terra, ou mesmo utilizando sistemas bifásicos (fase-fase). Considerando tais alternativas, os investimentos de capital para a realização das instalações de redes de distribuição MRT ainda são menores [7].

A demanda de energia elétrica nas redes monofásicas de distribuição rurais tem aumentado consideravelmente nas últimas décadas, tanto no ramo da agricultura como da pecuária, devido, principalmente, à crescente evolução e modernização das tecnologias empregadas, assim como pelo aumento da mecanização dos processos produtivos. Pode-se citar, por exemplo, a automatização da irrigação, bem como o processamento agrícola pós-colheita envolvendo seleção de sementes e moagem, ventilação e refrigeração, linhas de lavagem e embalagem, dentre outros.

Dentro deste contexto, percebe-se uma tendência iminente de aumento da demanda de energia em propriedades rurais, bem como a necessidade de fornecimento de energia de qualidade em função da mudança das características de cargas utilizadas.

A regulação de tensão se caracteriza como um dos principais problemas de Qualidade de Energia (QE)

Artigo submetido em 08/02/2017. Primeira revisão em 24/03/2017. Aceito para publicação em 08/05/2017 por recomendação do Editor Marcelo Cabral Cavalcanti.

encontrados nas redes monofásicas rurais [4], [5], pois, quando submetidas a grandes cargas, estas apresentam quedas de tensão significativas, enquanto que em horários de baixo consumo a tensão tende a se elevar [1]. No entanto, uma solução não tão eficiente em função das variações constantes de carga, pode ser adotada por meio do ajuste dos *taps* do transformador de entrada da rede MRT. Outra solução, neste caso mais eficiente, consiste na utilização de reguladores monofásicos de tensão [5].

Algumas formas para contornar grandes investimentos de capital para atender à crescente demanda das propriedades rurais têm sido empregadas [3], [8]. Em [3] são apresentados os impactos causados entre sistemas de geração distribuída implementados por meio de sistemas fotovoltaicos e os sistemas de distribuição MRT. Já em [8], o uso de sistemas de armazenamento de energia por meio de baterias e sua utilização em horários de pico é discutido.

Nota-se cada vez mais a necessidade em se utilizar as redes de distribuição trifásicas para atender a demanda por energia elétrica em áreas rurais, em função das mudanças de características das cargas. Atualmente, a maioria delas poderia ser acionadas por motores de indução trifásicos em substituição aos monofásicos, por apresentam maior torque de partida [7]. Além disso, a utilização de inversores de tensão trifásicos de médias e altas potências envolvidos em modernos sistemas automatizados também justifica a necessidade de redes trifásicas em áreas rurais. Sendo assim, a presença de um sistema local de distribuição de energia trifásico em áreas que fazem uso do sistema de distribuição MRT se torna cada vez mais indispensável.

Para este fim, diversas soluções e/ou configurações de conversores monofásicos-trifásicos têm sido abordadas na literatura [6], [7], [9], [10]. Dentre elas estão os conversores monofásicos-trifásicos a quatro-fios, os quais possuem capacidade para alimentar cargas trifásicas e monofásicas [6], [7], [9], ou ainda os conversores monofásicos-trifásicos a três fios destinados a alimentar apenas cargas trifásicas [10].

Similar a um condicionador unificado de qualidade de energia (UPQC – *Unified Power Quality Conditioner*), em [11] foi concebido um conversor monofásico-trifásico operando como filtro ativo de potência série e paralelo. Nesta topologia, o conversor série é composto por um inversor monofásico em ponte completa (dois braços inversores), enquanto o conversor paralelo é composto por um inversor

trifásico a três braços, totalizando cinco braços inversores. Diferente do que acontece com o estágio de retificação das topologias de conversores monofásicos-trifásicos convencionais [6], uma vantagem apresentada pela topologia apresentada em [11] reside no fato de que a energia necessária para alimentar a carga não ser toda ela processada pelo conversor série de entrada, aumentando assim o rendimento do sistema.

Em [12] foi apresentado um sistema local de distribuição de energia trifásico a quatro fios (3P4W – *3-Phase-4-Wire*), cuja implementação foi realizada por meio de um conversor monofásico-trifásico conforme mostrado na Figura 1. No entanto, apenas resultados obtidos via de simulações foram apresentados, assim como não foram abordados maiores detalhes referentes ao dimensionamento dos conversores. A referida topologia foi concebida a partir de um UPQC, a qual foi denominada de UPQC-Mono-Tri. Este sistema é indicado para aplicações em áreas rurais ou remotas, onde, por razões econômicas, apenas sistemas de distribuição de energia monofásicos são acessíveis ao consumidor.

Por desempenharem, simultaneamente, as funções de Filtro Ativo de Potência Série (FAPS) e Filtro Ativo de Potência Paralelo (FAPP), os UPQCs têm sido comumente empregados para mitigar problemas de QE, tanto em sistemas de distribuição monofásicos [13], quanto em sistemas de distribuição 3P4W [14]-[18].

Tradicionalmente os UPQCs são controlados para realizarem as compensações série e paralela, sintetizando grandezas não-senoidais de tensão e corrente, ou seja, o conversor série sintetiza grandezas de tensão não senoidais de forma a compensar distúrbios de tensão da rede, enquanto o conversor paralelo sintetiza grandezas de corrente não senoidais com o intuito de suprimir correntes harmônicas e compensar reativos da carga [14], [15].

Por outro lado, alguns trabalhos apresentados na literatura têm utilizado a estratégia de compensação dual no controle dos conversores série e paralelo de um UPQC [16]-[18]. Na referida estratégia, as referências de controle de tensão e corrente sintetizadas pelos conversores de potência são senoidais. Neste caso, uma vez que o conversor série sintetiza grandezas de corrente senoidais, este opera como uma fonte de corrente senoidal, oferecendo um caminho de alta impedância para os harmônicos de corrente existentes na carga.

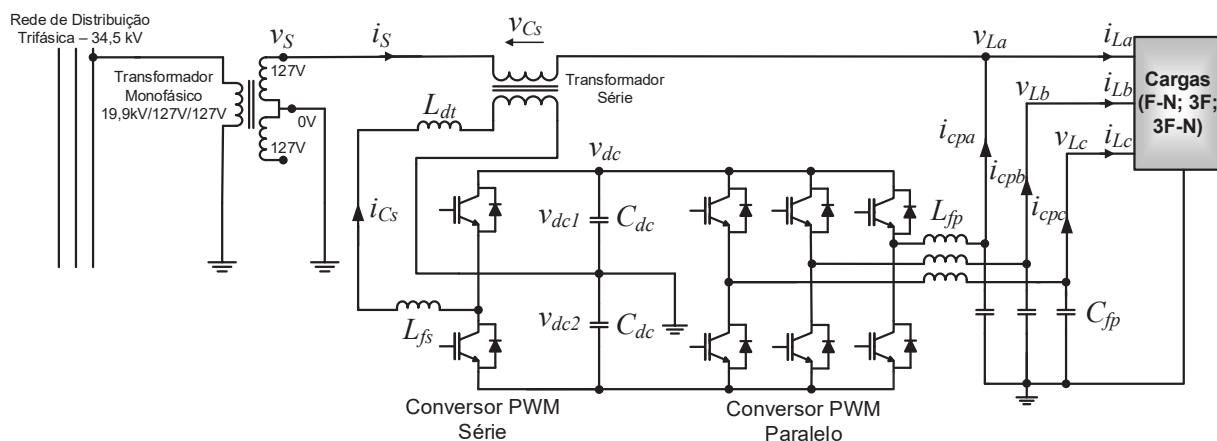


Fig. 1. Topologia do UPQC-Mono-Tri.

Já o conversor paralelo sintetiza grandezas de tensão senoidais e, neste caso, opera como uma fonte de tensão senoidal, oferecendo um caminho de baixa impedância para os harmônicos de corrente da carga. Percebe-se, porém, que para operar como UPQC com estratégia dual, os conversores série e paralelo devem operar sempre em conjunto.

Observa-se também que os desempenhos dos controladores são notadamente melhores quando operam com referências senoidais, quando comparados com aqueles que utilizam referências não senoidais. Além disso, uma vez que as referências de controle são senoidais, os controladores implementados no referencial síncrono possuirão suas referências de tensão e corrente contínuas, facilitando ainda mais o controle [18]. Outra vantagem da compensação dual está na forma de geração das referências de controle, a qual é realizada apenas com a utilização de um sistema de detecção de ângulo de fase (PLL – *Phase-Locked Loop*) [19].

Este trabalho apresenta como principal contribuição a validação experimental de um UPQC-Mono-Tri destinado a alimentar cargas trifásicas a partir de um sistema MRT, comumente encontrados em áreas rurais e/ou remotas.

Adotando a estratégia de compensação dual, o UPQC-Mono-Tri proposto neste trabalho possibilita drenar da rede elétrica monofásica uma corrente senoidal em fase com a tensão da rede. Além disso, o sistema também pode suprimir harmônicos da tensão da rede, assim como compensar distúrbios como afundamentos e elevações de tensão, melhorando os indicadores de qualidade de energia elétrica.

Desse modo, o UPQC-Mono-Tri proposto é capaz de conceber um sistema 3P4W com tensões de carga reguladas, balanceadas e senoidais e com baixos conteúdos harmônicos. Sendo assim, o sistema possui duas funções básicas principais, sendo elas, fazer a conversão da rede monofásica em rede trifásica, gerando um sistema de distribuição 3P4W com neutro aterrado ao consumidor final, bem como desempenhar concomitantemente a função de filtro ativo de potência universal. Com o objetivo auxiliar no adequado dimensionamento do UPQC-Mono-Tri, uma análise envolvendo o fluxo de potência pelos conversores série e paralelo é também apresentada neste trabalho.

II. DESCRIÇÃO DA TOPOLOGIA UPQC-MONO-TRI

A topologia do UPQC-Mono-Tri está apresentada na Figura 1. Esta é formada por dois conversores PWM, sendo eles um inversor monofásico *Half-Bridge* e um trifásico (*3-Leg*) compartilhando o mesmo barramento CC.

Nesta topologia, o conversor série, que em [11] foi implementado utilizando um inversor *Full-Bridge*, é substituído por um inversor *Half-Bridge*. Sendo assim, neste trabalho, o barramento CC é formado pela configuração de capacitor dividido (*Split-Capacitor*), possibilitando o acesso ao condutor de retorno aterrado da carga.

O conversor série, também denominado FAPS, é controlado em corrente de forma que a corrente drenada de entrada seja senoidal e em fase com a tensão da rede, resultando em um Fator de Potência (FP) muito próximo de um. Um indutor de filtragem (L_{fs}) é colocado em série com o enrolamento primário do transformador monofásico de acoplamento série.

O conversor paralelo, denominado FAPP, é controlado em tensão e impõe às cargas tensões trifásicas senoidais, reguladas e balanceadas. A tensão de carga da fase “a” (v_{La}) é controlada para estar em fase com a tensão da rede elétrica (v_s). Filtros de segunda ordem *LC* são utilizados para atenuar as componentes de alta frequência de tensão. Uma vez que o braço inversor conectado à fase “a” é controlado para funcionar como uma fonte de tensão senoidal, as componentes harmônicas e fundamental da tensão da rede são indiretamente compensadas pelo sistema, não havendo a necessidade de se utilizar algum algoritmo específico para calcular/extrair tais componentes. As componentes de tensão compensadas (harmônicos e fundamental) irão aparecer nos terminais do transformador de acoplamento em série.

O fluxo de energia através do UPQC-Mono-Tri dependerá tanto das características da carga como, por exemplo, fator de potência fundamental e Distorção Harmônica Total (DHT) de corrente, quanto das características da rede, tais como as diferenças entre as amplitudes da tensão de entrada e de saída (fase “a”), bem como a DHT de tensão.

III. GERAÇÃO DAS REFERÊNCIAS E DIAGRAMAS DE CONTROLE DOS CONVERSORES

Nesta seção são apresentadas as estratégias de geração das referências de controle dos conversores série e paralelo bem como suas modelagens.

A. Corrente de Referência do Conversor Série

A corrente de referência monofásica usada para controlar o FAPS é obtida no referencial síncrono *dq*, como mostrado na Figura 2. Sendo assim, as correntes de carga (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) são medidas e transformadas do sistema de eixos estacionário trifásico (*abc*) para o referencial estacionário bifásico ($\alpha\beta 0$) usando a transformada de Clarke. Depois disso, por meio da transformada de Park, as grandezas estacionárias de corrente do referencial $\alpha\beta 0$ são transformadas para o referencial síncrono *dq*. Neste referencial, as coordenadas do vetor unitário $sen(\theta)$ e $cos(\theta)$ são obtidos utilizando o sistema PLL apresentado em [19], onde θ é o ângulo de fase estimado da tensão da rede. A grandeza i_d , mostrada na Figura 2, representa as componentes ativas das correntes de carga, ou seja, esta é composta por uma parcela média bem como parcelas oscilantes/harmônicas no referencial *d*.

Por se tratar de um sistema monofásico-trifásico, a amplitude da corrente de referência monofásica de entrada/rede (i_{cs}^*) deve ser devidamente ajustada para garantir que a potência média monofásica de entrada (P_s) seja equivalente à potência média trifásica na saída (P_L).

No referencial síncrono, as potências P_L e P_s são definidas, respectivamente, por:

$$P_L = v d_{dc} i d_{dc} \quad (1)$$

$$P_s = (V_{sp} I_{sp})/2 \quad (2)$$

onde $v d_{dc}$ e $i d_{dc}$ representam, respectivamente, as componentes CC de tensão e corrente no eixo-*d*, enquanto V_{sp} e I_{sp} representam as respectivas tensão e corrente de pico da rede monofásica.

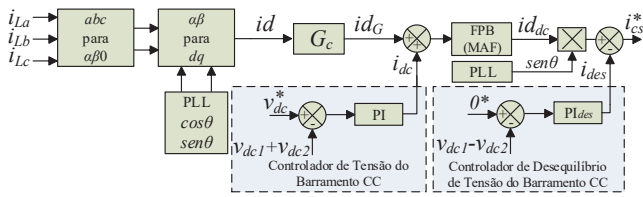


Fig. 2. Esquema de geração da referência de corrente do conversor série no referencial síncrono dq .

Assumindo que as amplitudes das tensões de saída V_{Lp} são iguais à da tensão da rede V_{sp} , vd_{dc} pode ser escrita por:

$$vd_{dc} = \sqrt{3/2} V_{Lp} = \sqrt{3/2} V_{sp}. \quad (3)$$

Considerando um sistema ideal, de tal forma que $P_s = P_L$, e por meio de (1), (2) e (3), a relação entre a corrente id_{dc} e corrente I_{sp} é dada como segue:

$$I_{sp} = \sqrt{6} id_{dc} = G_c id_{dc}. \quad (4)$$

Percebe-se em (4) a presença do ganho $G_c = \sqrt{6}$, o qual, necessariamente, deve ser inserido no algoritmo da Figura 2 de forma a adequar as potências de entrada e saída do UPQC-Mono-Tri.

A corrente id_{dc} mostrada na Figura 2 representa o sinal de saída do controlador Proporcional-Integral (PI) de tensão do barramento CC. Esta é somada à corrente do eixo síncrono direto id_G e é responsável pelo controle do balanço/fluxo de potência do sistema. Em outras palavras, id_{dc} é utilizada para desempenhar as seguintes funções: i. regular a tensão do barramento CC de forma a compensar as perdas envolvendo os elementos passivos de filtragem e os dispositivos de chaveamento; ii. ajustar da amplitude da corrente de referência senoidal do conversor série (i_{cs}^*) quando há variações de amplitude (afundamentos/elevações de tensão) entre a tensão de entrada e as de saída do UPQC-Mono-Tri.

A parcela de corrente $id_G = \sqrt{6} id$ é somada com id_{dc} e em seguida filtrada por meio de um Filtro Passa-Baixa (FPB) gerando a corrente id_{dc} .

Na Figura 2 também é mostrada a malha de controle usada para anular o desequilíbrio de tensão dos capacitores do barramento CC, onde modelo equivalente adotado para representar o controle do desequilíbrio é apresentado em [16]. O sinal de saída do referido controlador (i_{des}^*) atua no nível CC da corrente da rede. Sendo assim, a corrente de referência do conversor série é dada por:

$$i_{cs}^* = id_{dc} \text{sen}(\theta) - i_{des}^*. \quad (5)$$

Para melhorar a resposta dinâmica de filtragem, foi utilizado um filtro média móvel (MAF - *Moving Average Filter*) [20], atuando como FPB. O MAF se caracteriza por ser um filtro de fácil implementação e capaz de rejeitar as componentes de frequências múltiplas da frequência corte, sendo esta definida igual ao inverso do período de integração (T), ou ainda definido pelo período da componente fundamental. A Figura 3 apresenta a estrutura do MAF, a qual é composta por um bloco de integração, um bloco de atraso de transporte, um subtrator e um divisor.

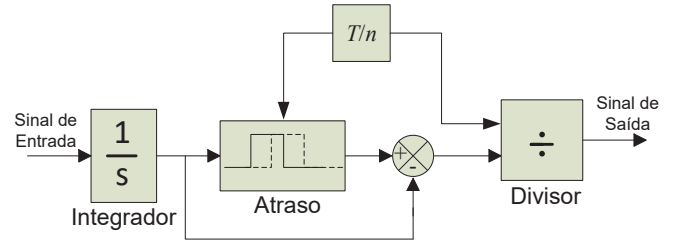


Fig. 3. Filtro média móvel.

Por se tratar de um sistema monofásico conectado à rede elétrica, deve-se considerar a presença de ondulações de tensão em 120Hz no barramento CC do UPQC-Mono-Tri. Tal ondulação pode resultar no aparecimento do harmônico de ordem 2 (120Hz) na referência de corrente do conversor série (i_{cs}^*), uma vez que i_{cs}^* contém informações do sinal de saída do controlador do barramento CC (id_{dc}).

Portanto, uma maneira de atenuar a amplitude do sinal nesta indesejada frequência, um FPB poderia ser utilizado na malha de controle de tensão do barramento CC. Entretanto, sua utilização poderia interferir na dinâmica do controle tornando-a mais lenta. Por esse motivo, optou-se em utilizar apenas um FPB (MAF) logo após a soma da corrente do controlador do barramento CC (id_{dc}) com a corrente do eixo direto id_G , conforme mostrado na Figura 2.

Além disso, caso existam correntes de carga desbalanceadas, também aparecerá no referencial síncrono uma componente fundamental de sequência negativa na frequência de 120Hz, ou seja, $T/2$ do período da componente fundamental.

Consequentemente, torna-se necessário que a frequência de corte do filtro média móvel seja 120Hz, ou seja, o número inteiro n representado na Figura 3 deve ser igual a 2.

B. Controlador de Corrente do Conversor Série

A Figura 4 apresenta, por meio de um diagrama em blocos, o controlador PI de corrente, bem como o modelo médio do conversor série [21].

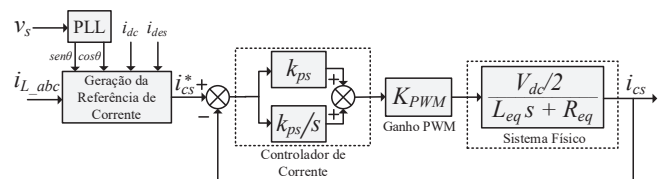


Fig. 4. Diagrama em blocos do controlador de corrente e do modelo médio do conversor série.

Assim, com base na Figura 4, a função de transferência do sistema pode ser escrita por:

$$\frac{i_{cs}(s)}{i_{cs}^*(s)} = \frac{K_{pwm}(V_{dc}/2)(K_{ps}s + K_{is})}{L_{eq}s^2 + (K_{ps}K_{pwm} \frac{V_{dc}}{2} + R_{eq})s + K_{is}K_{pwm} \frac{V_{dc}}{2}} \quad (6)$$

onde:

K_{ps} e K_{is} representam os respectivos ganhos proporcional e integral do controlador PI de corrente; K_{pwm} é o ganho PWM; L_{eq} é a indutância equivalente definida por $L_{eq} = N^2 L_{dt} + L_{fs}$, sendo L_{fs} a indutância do filtro série,

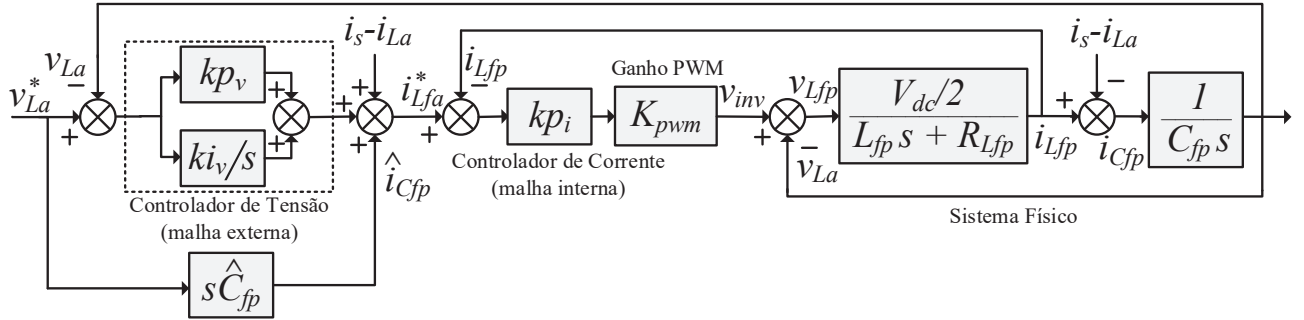


Fig. 5. Diagrama em blocos das malhas de controle de tensão e do modelo médio do conversor paralelo.

L_{dt} a indutância de dispersão refletida ao primário do transformador de acoplamento série, N a relação de transformação do transformador série ($N = 1$); R_{eq} é a resistência equivalente definida por $R_{eq} = N^2 R_{dt} + R_{fs}$, sendo R_{dt} a resistência interna do transformador série; R_{fs} a resistência interna do indutor série; e V_{dc} representa a tensão total do barramento CC, sendo esta composta pela soma das tensões sobre os capacitores do barramento, ou seja, $V_{dc} = V_{dc1} + V_{dc2}$.

C. Tensões de Referência do Conversor Paralelo

A tensão de saída da fase “a” é controlada para estar em fase com a tensão da rede elétrica. Desta forma, conhecido o ângulo de fase estimado da rede θ , bem como a amplitude desejada da tensão na carga V_{Lp} , as referências das tensões de saída são obtidas por:

$$v_{La}^* = V_{Lp} \sin(\theta) \quad (7)$$

$$v_{Lb}^* = V_{Lp} \sin(\theta - 120^\circ) \quad (8)$$

$$v_{Lc}^* = V_{Lp} \sin(\theta + 120^\circ). \quad (9)$$

D. Controladores de Tensão do Conversor Paralelo

A Figura 5 apresenta, por meio de um diagrama em blocos, as malhas de controle de tensão, bem como o modelo médio do conversor paralelo considerando apenas a fase “a”. As multi-malhas de controle são implementadas por uma malha interna de corrente, onde é utilizado apenas um controlador proporcional, e uma malha externa de tensão, na qual é utilizado um controlador PI. Sendo assim, a partir do diagrama da Figura 4, a função de transferência do sistema pode ser escrita por:

$$\frac{v_{La}(s)}{v_{La}^*(s)} = \frac{A(X_1 s^2 + X_2 s + X_3)}{Y_1 s^3 + Y_2 s^2 + Y_3 s + Y_4} \quad (10)$$

onde

$$A = K_{pwm} (V_{dc}/2);$$

$$X_1 = \hat{C}_{fjp} K_{pi};$$

$$X_2 = K_{pv} K_{pi}; \quad X_3 = K_{iv} K_{pi};$$

$$Y_1 = L_{fjp} C_{fjp}; \quad Y_2 = C_{fjp} [K_{pi} K_{pwm} (V_{dc}/2) + R_{Lfjp}];$$

$$Y_3 = [K_{pv} K_{pi} K_{pwm} (V_{dc}/2) + 1]; \quad e$$

$$Y_4 = K_{iv} K_{pi} K_{pwm} (V_{dc}/2).$$

Com base em (10), K_{pv} e K_{iv} representam os respectivos ganhos proporcional e integral do controlador PI da malha externa de tensão, K_{pi} é o ganho proporcional da malha interna de corrente, K_{pwm} é o ganho PWM, C_{fjp} é o capacitor de filtragem, \hat{C}_{fjp} é o capacitor de filtragem estimado, L_{fjp} é a indutância de filtragem, R_{Lfjp} é a resistência interna do indutor de filtragem L_{fjp} e V_{dc} é a tensão total do barramento CC.

Como mostrado na Figura 5, uma malha de controle *feed-forward* é usada no controle. A corrente \hat{i}_{cjp} do capacitor de filtragem \hat{C}_{fjp} é estimada, uma vez que esta não é medida/sensorada.

E. Controlador de Tensão do Barramento CC

Adotando um procedimento similar ao apresentado em [22], é possível obter o diagrama de controle de tensão do barramento CC como apresentado na Figura 6. Sendo assim, a função de transferência de malha fechada em pequenos sinais do sistema de controle do barramento CC é dada por:

$$\frac{\hat{v}_{dc}(s)}{\hat{v}_{dc}^*(s)} = \frac{v_d K_{Pdc} s + v_d K_{Idc}}{C_{dc} V_{dc} s^2 + v_d K_{Pdc} s + v_d K_{Idc}} \quad (11)$$

onde:

K_{Pdc} e K_{Idc} são os respectivos ganhos proporcional e integral do controlador PI do barramento CC; C_{dc} é a capacitância equivalente do barramento CC; V_{dc} é a tensão total do barramento CC e $v_d = \sqrt{3}/2 V_{sp}$ representa a tensão direta no sistema de eixos no referencial síncrono.

A equação (11) foi obtida considerando que a carga é alimentada por um sistema trifásico, cujas tensões são senoidais e equilibradas. Além disso, também foi admitido que a corrente drenada da rede elétrica é senoidal e em fase com a tensão também senoidal, ou seja, o UPQC-Mono-Tri opera com FP unitário.

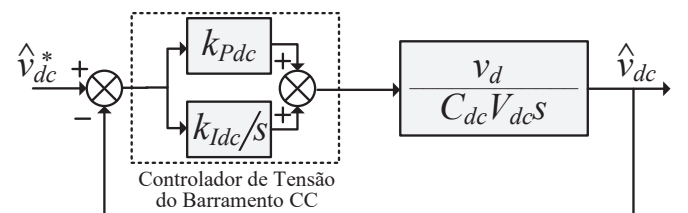


Fig. 6. Diagrama em blocos do sistema de controle de tensão do barramento CC.

IV. FLUXO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DOS CONVERSORES SÉRIE E PARALELO

Esta seção tem a finalidade de mensurar quantitativamente e em regime permanente, as potências aparentes que fluem através dos conversores série (S_{sc}) e paralelo ($S_{pc,a}$) conectado à fase “a” da carga, normalizadas em função da potência aparente total da carga (S_L). O conversor paralelo conectado à fase “a” do UPQC-Mono-Tri terá que, necessariamente, processar mais potência quando comparado aos outros conversores conectados às fases “b” e “c” da carga. Neste caso, maior atenção deve ser dada a este conversor no que diz respeito ao seu dimensionamento.

Para a análise do fluxo de potência são levados em consideração a relação entre os valores eficazes das tensões fundamentais de saída V_L e da rede V_{s1} (V_L/V_{s1}), assim como os fatores de potência fundamentais ($\cos \phi_{1a}$, $\cos \phi_{1b}$, $\cos \phi_{1c}$) e as distorções harmônicas totais de corrente de cada uma das fases da carga ($DHTi_{La}$, $DHTi_{Lb}$ e $DHTi_{Lc}$).

A. Fluxo de Potência Aparente - Conversor Série

Para efeito de análise, em regime permanente, as seguintes condições são consideradas para a determinação o fluxo de potência através do conversor série: i. a corrente de entrada é senoidal (sem harmônicos) e encontra-se em fase com a componente fundamental da tensão da rede; ii. a tensão da carga na fase “a” é senoidal (sem harmônicos) e encontra-se em fase com a componente fundamental da tensão da rede (v_{s1}); iii. a tensão da rede possui harmônicos de tensão; iv. as tensões da carga são senoidais e equilibradas e possuem o mesmo valor eficaz, ou seja, $V_{L,abc} = V_L$; v. os valores eficazes das tensões fundamentais entre a entrada e saída do UPQC-Mono-Tri se situam dentro de um limite de $\pm 25\%$, ou seja, $0,75 < V_{s1}/V_L < 1,25$. Assim, o módulo da potência aparente do conversor série é dado por:

$$|S_{sc}| = P_L \sqrt{\left(1 - \frac{V_L}{V_{s1}}\right)^2 + DHT_{Vs}^2} \quad (12)$$

onde:

$P_L = P_a + P_b + P_c$ é a potência ativa total da carga e DHT_{Vs} é a distorção harmônica total da tensão da rede.

Supondo cargas balanceadas, de modo que as potências aparentes fundamentais das fases abc sejam iguais entre si, ou seja, $S_{La} = S_{Lb} = S_{Lc}$, o módulo da potência normalizada $|S_{sc}/S_L|$ é dado por:

$$\left|\frac{S_{sc}}{S_L}\right| = \frac{K \sqrt{\left(1 - \frac{V_L}{V_{s1}}\right)^2 + DHT_{Vs}^2}}{\sqrt{1 + DHTi_{La}^2} + \sqrt{1 + DHTi_{Lb}^2} + \sqrt{1 + DHTi_{Lc}^2}} \quad (13)$$

onde:

$K = (\cos \phi_{1a} + \cos \phi_{1b} + \cos \phi_{1c})$.

A Figura 7.a apresenta a curva normalizada $|S_{sc}/S_L|$ onde percebe-se claramente que dois fatores influenciam mais significativamente no aumento da potência processada pelo conversor série, sendo eles a relação V_{s1}/V_L e a DHT_{Vs} . Para a obtenção das curvas “a1” foram consideradas $DHT_{Vs} = 0\%$, $\cos \phi_{1abc} = 1,0$ e $DHTi_{Labc}$ variando de 0% a 90%. Já para

as curvas “b1” foram consideradas $DHT_{Vs} = 0\%$, $\cos \phi_{1abc} = 0,7$ e $DHTi_{Labc}$ variando de 0% a 90%. Por fim, para as curvas “a2” foram consideradas $DHT_{Vs} = 30\%$, $\cos \phi_{1abc} = 1,0$ e $DHTi_{Labc}$ variando de 0% a 90%.

Observa-se que o conversor série sempre opera com potências inferiores à potência aparente nominal da carga. Assim, pelas condições de operação apresentadas na Figura 7.a, para atender ao caso mais crítico onde $V_{s1} = 0,75 V_L$ (curvas a2), o conversor série deve ser dimensionado com potência em torno de apenas 45% da potência nominal do sistema, o que representa uma vantagem quando comparado com as topologias convencionais de conversores Mono-Tri.

B. Fluxo de Potência Aparente - Conversor Paralelo

Para o cálculo da potência aparente processada na fase “a” do conversor paralelo foi considerada que a tensão da carga v_{La} , a tensão de rede v_s e a corrente da rede i_s são senoidais e livre de harmônicos. Além disso, considerou-se que as três grandezas citadas estão em fase uma com as outras. Assim, o módulo da potência aparente do conversor paralelo, normalizada em função da potência aparente da carga, $|S_{pc,a}/S_L|$ é dado por:

$$\left|\frac{S_{pc,a}}{S_L}\right| = \frac{\sqrt{A \cos^2 \phi_{1a} + 2B \cos \phi_{1a} + C + D}}{\sqrt{1 + DHTi_{La}^2} + \sqrt{1 + DHTi_{Lb}^2} + \sqrt{1 + DHTi_{Lc}^2}} \quad (14)$$

onde:

$$A = \left[\frac{V_L}{V_{s1}} \left(\frac{V_L}{V_{s1}} - 2\right)\right];$$

$$B = \left[\frac{V_L}{V_{s1}} \left(\frac{V_L}{V_{s1}} - 1\right) (\cos \phi_{1b} + \cos \phi_{1c})\right];$$

$$C = \left(\frac{V_L}{V_{s1}}\right)^2 (\cos \phi_{1b} + \cos \phi_{1c})^2; \text{ e}$$

$$D = (1 + DHTi_{La}^2).$$

A Figura 7.b apresenta a curva normalizada $|S_{pc,a}/S_L|$, onde percebe-se que mesmo em condições ideais onde $V_{s1}/V_L=1$, $\cos \phi_{1abc} = 1,0$ e $DHTi_{Labc} = 0\%$ ainda há um fluxo de potência fluindo através do conversor paralelo conectado à fase “a”. Isto acontece devido à potência ativa consumida pelas cargas conectadas às fases “b” e “c”. Para a obtenção das curvas representadas por “a” foram consideradas $\cos \phi_{1abc} = 1,0$ e $DHTi_{Labc}$ variando de 0% a 90%, enquanto para as curvas “b” foram consideradas $\cos \phi_{1abc} = 0,7$ e $DHTi_{Labc}$ variando de 0% a 90%.

Como dito anteriormente, o conversor paralelo conectado à fase “a” da carga sempre opera com potências mais elevadas quando comparado às fases “b” e “c”. Assim, pela Figura 7.b, para atender ao pior caso de operação onde $V_{s1} = 0,75 V_L$, o conversor paralelo deve ser dimensionado com potência equivalente 100% da potência nominal da carga. No entanto, cabe ressaltar que apenas o conversor conectado à fase “a” deve atender a esta especificação.

C. Fluxo de Potência Ativa - Conversores Série e Paralelo

Os sentidos do fluxo de potência ativa instantânea “ $p=Ipu$ ”, podem ser visualizados por meio da Figura 8, na qual foram considerados três situações de operação distintas em regime permanente, ou seja, $V_{s1} = 0,75 V_L$, $V_{s1} = V_L$ e $V_{s1} = 1,25 V_L$. As perdas existentes nos elementos passivos e nas chaves de potência do UPQC-Mono-Tri não são consideradas na análise.

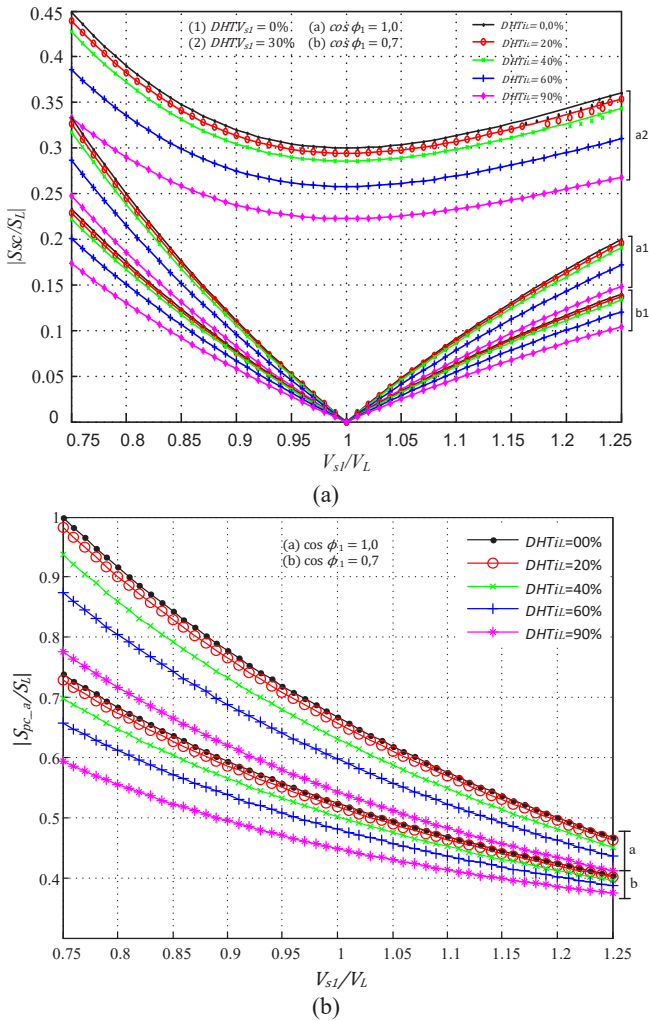


Fig. 7. Potências aparentes normalizadas: (a) Conversor Série $|S_{sc}/S_L|$; (b) conversor paralelo fase “a” $|S_{pc,a}/S_L|$.

Na Figura 8.a considera-se uma condição de operação de subtensão superestimada equivalente a 25% da rede elétrica, ou seja, $V_{s1} = 0,75 V_L$. Neste caso, observa-se que a potência p flui da rede para o conversor paralelo ($1pu$) e do barramento CC para o conversor série ($0,33pu$). Percebe-se que nessa condição de operação (25% de afundamento de tensão), o conversor paralelo conectado à fase “a” processa potência equivalente à potência ativa total da carga.

A condição de operação onde $V_{s1} = V_L$ é apresentada na Figura 8.b. Nesta condição, a potência ativa processada pelo conversor série é nula. No entanto, 2/3 (66%) da potência ativa da carga flui através do conversor paralelo conectado à fase “a”, ou seja, a quantidade de potência ativa necessária para suprir as cargas conectadas às fases “b” e “c”.

Na Figura 8.c tem-se uma condição de operação, também superestimada, de 25% de sobretensão da rede elétrica, ou seja, $V_{s1} = 1,25 V_L$. Neste caso, a potência p flui da rede para o conversor paralelo ($0,46pu$) e da rede para o barramento CC através do conversor série ($0,20pu$), totalizando os 2/3 (66%) da potência ativa exigida pelas cargas conectadas às fases “b” e “c”. Para esta condição de operação (25% de sobretensão), o conversor paralelo conectado à fase “a” processa menos potência quando comparado à situação de afundamento de tensão (subtensão).

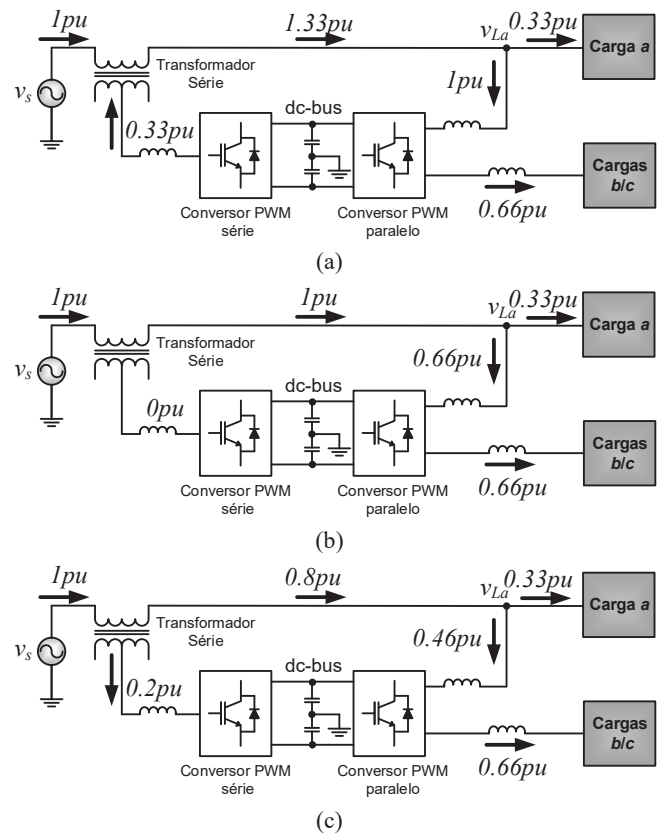


Fig. 8. Fluxo de potência ativa: (a) $V_s = 0,75 V_L$; (b) $V_s = V_L$; (c) $V_s = 1,25 V_L$.

V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os desempenhos estáticos e dinâmicos do UPQC-Mono-Tri em estudo foram avaliados por meio de experimentos. O esquema elétrico de potência e de controle são mostrados na Figura 9.a, enquanto a estrutura experimental está apresentada na Figura 9.b.

O conjunto de potência do sistema é constituído por um módulo inversor (SKS 50F B6U, *Semikron*), o qual possui quatro braços de IGBTs SKM100GB 124D (100A/1200V). Um braço inversor é usado para a construção do inversor série, enquanto os outros três braços compõem o inversor paralelo. Esse módulo ainda possui 4 drivers isolados (SKHI22B) e capacitores eletrolíticos que resultam em uma capacitância equivalente igual a 9400 μF no barramento CC.

Como pode ser observado na Figura 9.b, os algoritmos de geração de referências de controle, os controladores de corrente e tensão e o sistema PLL foram embarcados em um processador digital de sinais (DSP TMS320F28335, *Texas Instruments*). Sensores de corrente LEM LA 100-P foram usados para medir as correntes de carga, assim como as correntes dos indutores dos inversores série e paralelo usadas no controle. Já as tensões CA de entrada e saída e do barramento CC foram medidas por meio dos sensores de tensão LEM LV 25-P.

Os parâmetros do UPQC-Mono-Tri e as cargas lineares e não lineares utilizadas nos testes experimentais estão mostrados, respectivamente, nas Tabelas I e II, enquanto os ganhos dos controladores, juntamente com suas respectivas especificações de projeto, são apresentados na Tabela III.

Neste trabalho, o método de sintonia dos controladores PI é feita pela resposta em frequência do sistema em malha aberta, considerando a margem de fase e a frequência de cruzamento de ganho em 0dB como especificações de projeto [22]. Para efeito de simplificação, atrasos referentes à implementação digital foram desconsiderados no projeto.

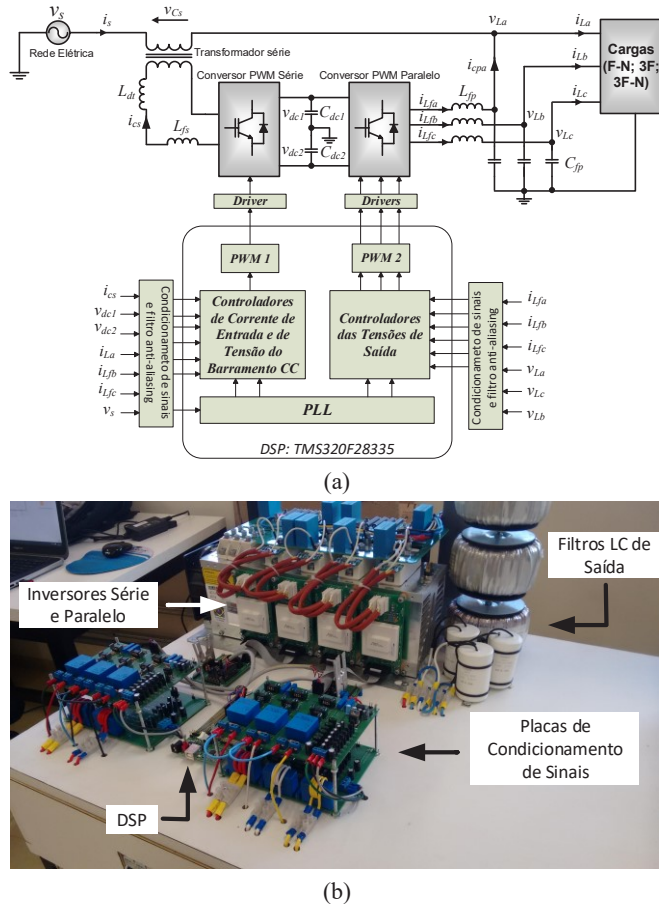


Fig. 9. Estrutura experimental do UPQC-Mono-Tri.

TABELA I

Parâmetros Utilizados nos Ensaios do UPQC-Mono-Tri	
Potência aparente da carga 1 1Φ	$S_{La}=600$ VA, $S_{Lb}=300$ VA, $S_{Lc}=400$ VA
Potência aparente da carga 2 1Φ	$S_{La}=S_{Lb}=S_{Lc}=538$ VA
Potência aparente da carga 1 3Φ	$S_L=1860$ VA
Potência aparente da carga 2 3Φ	$S_L=1372$ VA
Tensão eficaz nominal da rede monofásica	$V_s=127$ V
Tensão eficaz nominal da carga trifásica (fase)	$V_{L,a,b,c}=127$ V
Frequência nominal da rede	$f_s=60$ Hz
Frequência de chaveamento dos inversores	$f_{ch}=20$ kHz
Indutâncias do conversor paralelo	$L_{fp,a,b,c}=1,75$ mH
Resistências internas dos indutores do conversor paralelo	$R_{Lfp,a,b,c}=0,17$ Ω
Capacitâncias dos filtros paralelos	$C_{fp,a,b,c}=50$ μF
Indutâncias do conversor série	$L_{fs,a,b,c}=1,75$ mH
Resistência interna do indutor (conversor série)	$R_{Lfs}=0,17$ Ω
Indutância de dispersão do transformador série	$L_{dt}=0,18$ mH
Resistência do transformador série	$R_{dt}=0,162$ Ω
Relação de transformação do transformador	$N=1$
Tensão do barramento CC	$V_{dc}=500$ V
Capacitância do barramento CC	$C_{dc}=9400$ μF
Frequência de amostragem do DSP	$f_a=60$ kHz
Ganho do modulador PWM	$K_{PWM}=2,66 \cdot 10^{-4}$

TABELA II

Parâmetros das Cargas Utilizadas nos Experimentos				
Conjuntos de cargas monofásicas (1Φ)	Fase A	Fase B	Fase C	
Retificador 1Φ em ponte completa	1	R=20 Ω L=200 mH	R=40 Ω L=346 mH	R=30 Ω L=400 mH
	2	R=30 Ω	R=30 Ω	R=30 Ω
Cargas trifásicas (3Φ)		Fases ABC		
Retificador 3Φ em ponte completa	1	R=50 Ω		
Motor de indução trifásico	2	220V/1CV (60Hz, 1730 rpm, 4 polos, $\cos \varphi = 0,76$, $\eta = 70,6\%$)		

O primeiro teste envolvendo o UPQC-Mono-Tri levou em consideração o sistema alimentando o conjunto de cargas 1 monofásicas (Tabela II), conforme pode ser visto na Figura 10. As correntes desbalanceadas de fase (i_{La} , i_{Lb} e i_{Lc}) e a corrente de retorno da carga (i_{Ln}) são mostradas na Figura 10.a. Já na Figura 10.b são apresentadas as tensões de alimentação da carga (v_{La} , v_{Lb} e v_{Lc}) juntamente com a corrente drenada da rede monofásica i_s , onde observa-se que i_s encontra-se em fase com v_{La} . Na Figura 10.c são apresentadas a tensão v_s e a corrente i_s da rede, a qual possui características senoidais e em fase com a tensão, resultando em um elevado FP. A Figura 10.d apresenta a corrente da fase “a” da carga i_{La} , a corrente da rede i_s , bem como a corrente de compensação da fase “a” do conversor paralelo (i_{cpa}). Nota-se que o aspecto da corrente i_{cpa} é próximo ao de uma senoide, indicando que além das componentes harmônicas de carga da fase “a” o conversor paralelo conectado à respectiva fase também processa energia ativa (componente fundamental) destinada a alimentar as cargas conectadas às fases “b” e “c”.

No segundo teste a carga 1 trifásica (Tabela II) foi alimentada pelo UPQC-Mono-Tri, conforme apresentado pela Figura 11, enquanto no teste 3 (Figura 12) são apresentados os resultados do terceiro teste considerando a carga 2 trifásica (Tabela II).

Percebe-se por meio dos testes apresentados nas Figuras 10, 11 e 12 que os comportamentos estáticos da corrente da rede (i_s) e das tensões na carga (v_{La} , v_{Lb} e v_{Lc}) são muito similares entre si.

Para os testes 1 e 2, as correntes de compensação i_{cpa} são compostas por parcelas não ativas (harmônicos e reativos) envolvidas na compensação da corrente da carga (fase “a”), bem como por parcelas ativas de corrente destinadas à alimentação das fases b e c. Já para o teste 3, por se tratar de um motor de indução trifásico, a corrente i_{cpa} é composta, predominantemente, por componentes fundamentais, ou seja, ativa e reativa.

A Tabela IV apresenta as DHTs das grandezas de corrente e tensão para todos os experimentos realizados. As DHTs foram medidas por meio de um analisador de qualidade de energia (AQE) (Fluke 43B). Observa-se que em todos os casos as DHTs da corrente da rede i_s e das tensões da carga $v_{L,abc}$ ficaram abaixo de 5%.

A Tabela V apresenta as potências e os fatores de potência medidos nas cargas (L) e na rede elétrica (R), também utilizando o mesmo AQE (Fluke 43B).

Foram consideradas as potências na carga bem como em cada uma das fases (*abc*), nas quais foram medidas as potências aparentes (S), as potências ativas (P) e as potências não ativas (N). A potência N (VAr), definida em [23], contempla todas as potências não ativas, ou seja, as potências reativas e/ou harmônicas.

Também são apresentados na Tabela V o FP e o FP fundamental (FP₁), conhecido como Fator de Deslocamento (FD) [23]. Considerando todos os experimentos realizados, pode-se notar que o FP na rede é muito próximo de um.

TABELA III

Ganhos dos Controladores e Especificações de Projeto

Eixos	Conversor Paralelo		Conversor Série	
	Laço Externo	Laço Interno	$K_{p_{s,a}}$	$K_{i_{s,a}}$
<i>abc</i>	$K_{p_{v,abc}}$	$K_{i_{v,abc}}$	$K_{p_{i,abc}}$	
	0,1337	391,6086	137,45	248,043
				1,0455.10 ⁶
	Barramento CC		$K_{p_{dc}}$	$K_{i_{dc}}$
			0,618	2,487
	Desbalanço do Barramento CC		$K_{p_{des}}$	$K_{i_{des}}$
			0,2853	1,8965
	Frequência de cruzamento da malha interna de corrente do conversor paralelo		$\omega_{cpi} = 10,47.10^3 \text{ rad/s}$	
	Frequência de cruzamento da malha externa de tensão do conversor paralelo		$\omega_{cpv} = 3,49.10^3 \text{ rad/s}$	
	Margem de fase		$MF_p = 50^\circ$	
	Frequência de cruzamento da malha de corrente do conversor série		$\omega_{csi} = 19,33.10^3 \text{ rad/s}$	
	Margem de fase		$MF_s = 78^\circ$	
	Frequência de cruzamento da malha de tensão do barramento CC		$\omega_{ccc} = 25,13 \text{ rad/s}$	
	Margem de fase		$MF_{vcc} = 75^\circ$	
	Frequência de cruzamento(malha de controle de desequilíbrio do barramento CC		$\omega_{c_{des}} = 37,67 \text{ rad/s}$	
	Margem de fase		$MF_{des} = 80^\circ$	

TABELA IV

DHT das Grandezas de Corrente e Tensão

CARGAS	Distorção Harmônica Total (DHT%)							
	\hat{i}_{La}	\hat{i}_{Lb}	\hat{i}_{Lc}	\hat{i}_s	v_{La}	v_{Lb}	v_{Lc}	v_s
Carga 1 (1Φ)	34,4	32,8	30,8	4,0	3,4	3,8	3,2	2,3
Carga 1 (3Φ)	27,1	26,3	23,6	4,0	3,7	4,5	4,5	2,3
Carga 2 (3Φ)	2,6	2,6	2,6	4,3	1,5	1,5	1,4	2,0

TABELA V

Potências (S, P e N) e Fatores de Potência (FP e FP₁)

Potências e FPs		Carga 1 (1Φ)			Carga 1 (3Φ)			Carga 2 (3Φ)
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>abc</i>
S (kVA)	<i>L</i>	0,61	0,31	0,39	0,50	0,48	0,51	1,40
	<i>R</i>	1,7	-	-	2,04	-	-	1,51
P (kW)	<i>L</i>	0,56	0,29	0,36	0,48	0,46	0,48	1,15
	<i>R</i>	1,71	-	-	2,02	-	-	1,51
N (kVAr)	<i>L</i>	0,23	0,13	0,15	0,15	0,15	0,15	0,79
	<i>R</i>	0,24	-	-	0,30	-	-	0,26
FP	<i>L</i>	0,93	0,92	0,92	0,96	0,96	0,96	0,83
	<i>R</i>	0,99	-	-	0,99	-	-	0,98
FP ₁	<i>L</i>	1,00	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	0,83
	<i>R</i>	1,00	-	-	1,00	-	-	1,0

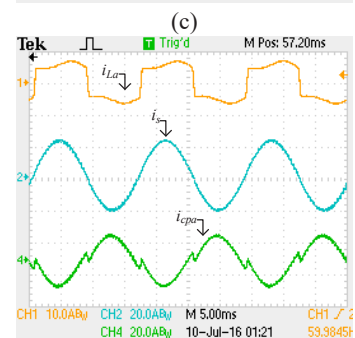
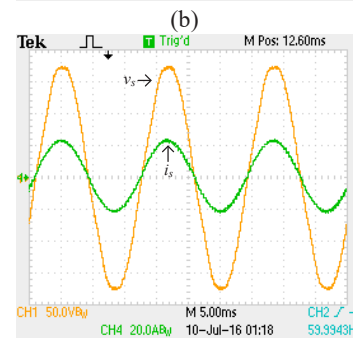
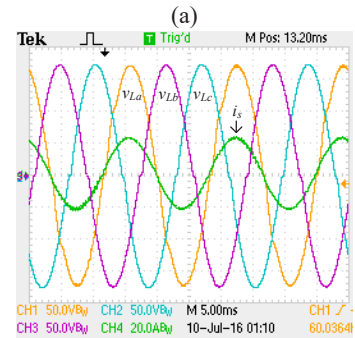
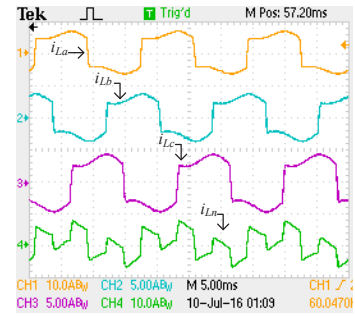


Fig. 10. UPQC-Mono-Tri (Carga 1 1Φ) (5 ms/div): (a) Correntes da carga i_{La} e i_{Ln} (10 A/div), i_{Lb} e i_{Lc} (5 A/div); (b) Tensões da carga $v_{L,abc}$, (50V/div) e corrente da rede i_s (20 A/div); (c) Tensão (50V/div) e corrente (20A/div) da rede; (d) Correntes i_{La} (10A/div), i_s (20A/div) e do conversor paralelo i_{cpa} (20A/div).

O comportamento estático das tensões do UPQC-Mono-Tri pode ser observado por meio da Figura 13, onde o conjunto de cargas 2 monofásicas são alimentadas. São apresentadas a tensão de carga da fase “a” v_{La} , tensão da rede/entrada v_s e a tensão sobre o transformador série v_{Cs} . Foram considerados nos teste apresentados nas Figuras 13.a, 13.b e 13.c valores eficazes distintos de tensão entre a rede e a tensão da fase “a”, ou seja, $V_s \cong V_{La}$, $V_s > V_{La}$ e $V_s < V_{La}$. Já na Figura 13.d a tensão da rede foi emulada por uma fonte de tensão CA (FCATH 450-22-50, *Supplier*), onde

introduziu-se 12% de DHT_v. Já na carga, a DHT_v encontrada foi de 4%. Nota-se que a diferença entre a tensão da rede e a tensão da fase “a” da carga aparecem sobre os terminais do transformador de acoplamento série (v_{CS}). Esta tensão é composta por componentes harmônicas, bem como por uma componente na frequência fundamental.

A Figura 14 apresenta resultados experimentais que permitem avaliar o comportamento dinâmico do UPQC-Mono-Tri, utilizando o conjunto de cargas 2 monofásicas (Carga 2 1Φ) descrito na Tabela II. Na Figura 14.a é mostrado o comportamento dinâmico do sistema mediante degraus de entrada e saída de carga. Além da corrente da rede i_s , são apresentadas a tensão total do barramento CC (v_{dc}) e as tensões sobre os capacitores v_{dc1} e

v_{dc2} . Pode-se observar a atuação do controlador de tensão do barramento CC sobre a corrente de entrada do sistema de forma a manter constante a tensão do barramento CC em 500V. O equilíbrio de tensão nos capacitores fica mais evidente por meio da Figura 14.b, na qual é obtida visualizando uma janela de tempo (zoom), obtida a partir da Figura 14.a. Pela Figura 14.c observa-se a existência de um afundamento de tensão (sag) equivalente a 15% da tensão nominal da rede, com duração de 10 ciclos, ou seja, 0,166 ms. Observa-se que durante o afundamento, a tensão de saída na fase “a” permanece inalterada, o que indica que a mesma não é afetada pelo distúrbio. A tensão sobre os terminais do transformador de acoplamento série (v_{CS}) evidencia o bom comportamento do sistema frente ao referido distúrbio.

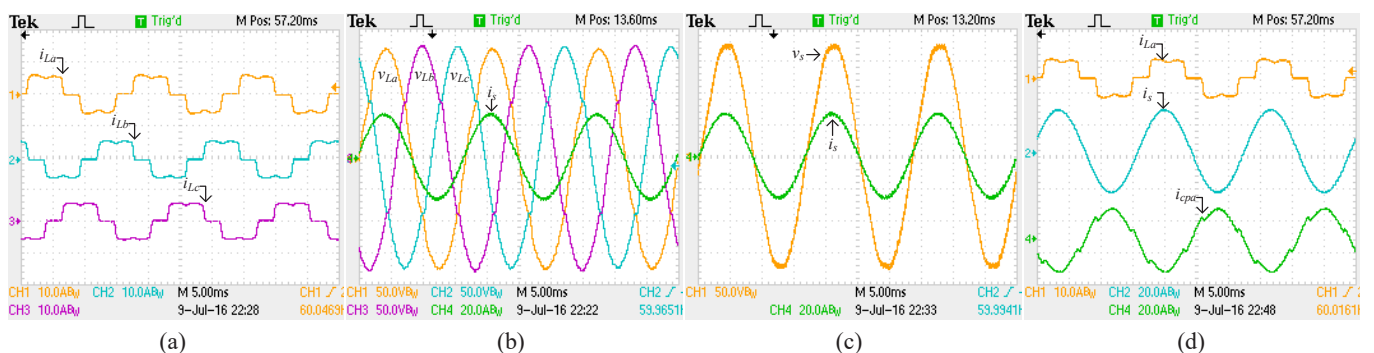


Fig. 11. Correntes e tensões do UPQC-Mono-Tri alimentando a carga 1 trifásica (5 ms/div): (a) Correntes da carga i_{La} , i_{Lb} , e i_{Lc} (10 A/div); (b) Tensões da carga v_{La} , v_{Lb} e v_{Lc} (50V/div) e corrente da rede i_s (20 A/div); (c) Tensão da rede (50V/div) e corrente da rede (20A/div); (d) Correntes da fase “a” da carga i_{La} (10A/div), da rede i_s (20A/div) e da fase “a” do conversor paralelo i_{cpa} (20A/div).

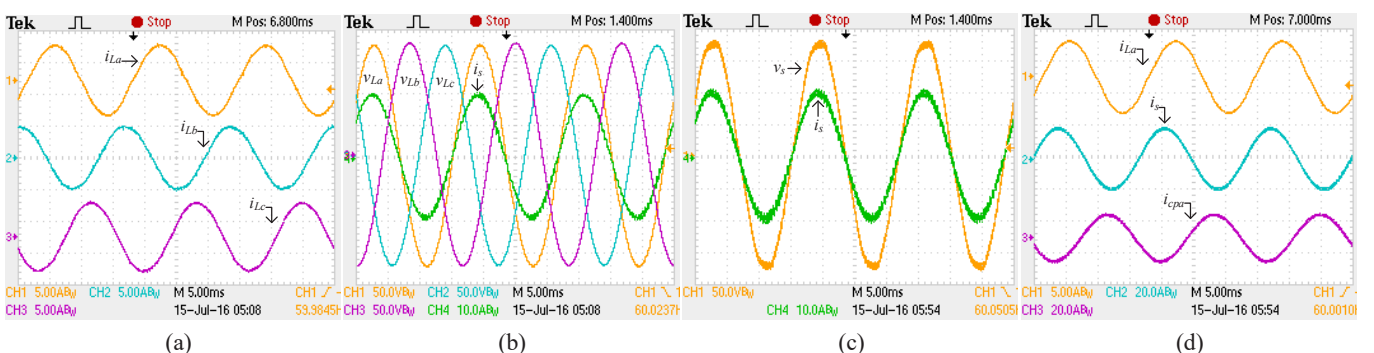


Fig. 12. Correntes e tensões do UPQC-Mono-Tri alimentando a carga 2 trifásica (5 ms/div): (a) Correntes da carga i_{La} , i_{Lb} , e i_{Lc} (5 A/div); (b) Tensões da carga v_{La} , v_{Lb} e v_{Lc} (50V/div) e corrente da rede i_s (10 A/div); (c) Tensão da rede (50V/div) e corrente da rede (10A/div); (d) Correntes da fase “a” da carga i_{La} (5A/div), da rede i_s (20A/div) e da fase “a” do conversor paralelo i_{cpa} (20A/div).

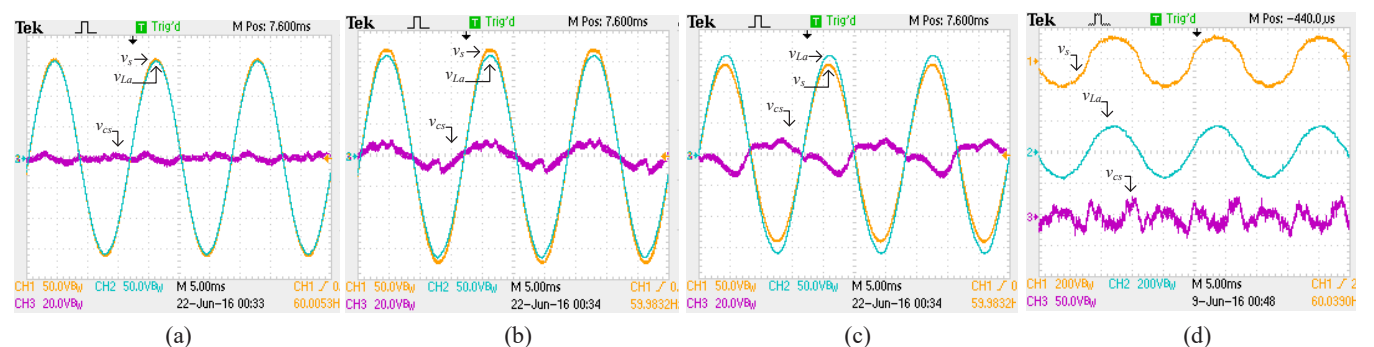


Fig. 13. UPQC-Mono-Tri operando com o conjunto de cargas 2 monofásicas: Tensões da rede v_s e da carga v_{La} (50 V/div, 5 ms/div) e tensão do transformador de acoplamento série v_{CS} (20 V/div, 5 ms/div): (a) $V_s \cong V_{La}$, (b) $V_s > V_{La}$, (c) $V_s < V_{La}$; (d) $V_s \cong V_{La}$: v_s e v_{La} (200 V/div, 5 ms/div) e v_{CS} (50 V/div, 5 ms/div).

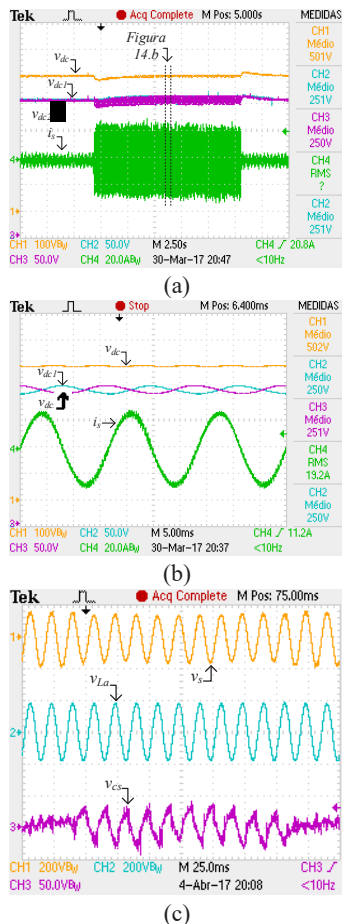


Fig. 14. Ensaios dinâmicos do UPQC-Mono-Tri. (a) Degraus de entrada e saída de carga (2,5s/div): Tensão total do barramento CC (100V/div), Tensões dos capacitores de barramento CC (50V/div) e corrente da rede (20A/div); (b) Detalhe da Figura 14.a (5ms/div); (c) Sag de tensão (25ms/div): Tensões da rede v_s (200V/div), da carga v_{La} (176V/div) e do transformador série v_{CS} (50V/div).

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a validação experimental de um sistema local de distribuição de energia trifásico a quatro fios. O sistema, indicado para aplicações em áreas rurais ou remotas onde redes de distribuição trifásicas não são acessíveis, foi concebido com base em um condicionador de qualidade de energia unificado.

Com capacidade de filtragem série e paralela, utilizou-se para compor o UPQC-Mono-Tri duas topologias de inversores. Com a primeira (*Half-Bridge*) implementou-se o conversor série monofásico e com a segunda (*3-Leg*) implementou-se o conversor paralelo trifásico. Assim, utilizando-se uma estratégia de compensação dual, o sistema proposto foi capaz de alimentar cargas trifásicas lineares e não-lineares atuando com capacidade de filtragem ativa universal, ou seja, atuando como FAPS e FAPP.

Além disso, foi apresentado um procedimento que permite dimensionar os conversores série e paralelo da estrutura de potência sob diversas condições de operação, tanto da rede quanto da carga. Os comportamentos estáticos e dinâmicos do UPQC-Mono-Tri foram avaliados experimentalmente, comprovando o bom desempenho do sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Hosseinzadeh, J. Rattray, “Economics of Upgrading SWER Distribution Systems”, in *Proc. of Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 1-7, 2008.
- [2] F. Rosa, S. T. Mak, “A Look into Steady State and Transient Performance of Power Lines Integrating Single Wire Earth Return Circuits” in *Proc. of IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-7, 2007.
- [3] A. Guinane, G. M. Shafullah, A. M. T. Oo, B. E. Harvey, “Voltage Fluctuations in PV Penetration on SWER Networks - A Case Study for Regional Australia”, in *Proc. of IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-6, 2012.
- [4] P. J. Wolf, “Capacity Improvements for Rural Single Wire Earth Return Systems” in *Proc. of 7th International Power Engineering Conference (IPEC)*, pp. 1-8, 2005.
- [5] S. N. Lowry, A. M. T. Oo, G. Robinson, “Deployment of Low Voltage Switched Capacitors on Single Wire Earth Return Networks”, in *Proc. of 22nd Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 1-5, 2012.
- [6] M. D. Bellar, M. Aredes, J. L. Silva Neto, L. G. B. Rolim, F. C. Aquino, V. C. Petersen, “Single-Phase Static Converters for Rural Distribution System”, in *Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp.1237-1242, 2004.
- [7] R. Z. Scapini, C. Rech, T. B. Marchesan, L. Schuch, R. F. Camargo, L. Michels, “Distribution STATCOM Integrated to a Single-Phase to Three-Phase Converter” in *Proc. of 40th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp.1423-1429, 2014.
- [8] A. Helwig, T. Ahfock, “Long-Life Nickel Iron Battery Functionality/Cost Comparison for Peak Demand SWER Network Voltage Support Application”, in *Proc. of 23th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 1-6, 2013.
- [9] E. C. Santos, C. B. Jacobina, G. A. A. Carlos, I. S. Freitas, “Component Minimized AC-DC-AC Single-Phase to Three-Phase Four-Wire Converters”, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol.58, n° 10, pp. 4624-4635, October 2011.
- [10] N. Rocha, I. A. C. Oliveira, E. C. Menezes, C. B. Jacobina, J. A. A. Dias, “Single-Phase to Three-Phase Converters with Two Parallel Single-Phase Rectifiers and Reduced Switch Count”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, n° 5, pp. 3701-3716, May 2016.
- [11] E. C. Santos Jr, C. B. Jacobina, J. A. A. Dias, N. Rocha, “Single-Phase to Three-Phase Universal Active Power Filter”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, n° 3, pp. 1361-1371, July 2011.
- [12] F. A. Negrão, S. A. O. Silva, R. A. Modesto, “A Single-Phase to Three-Phase UPQC Topology with Universal Filtering Capabilities,” in *Proc. of 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st IEEE Southern Power Electronics Conference*, pp. 1-6, 2015.

- [13] V. Khadkikar, A. Chandra, A. O. Barry, T. D. Nguyen, "Power Quality Enhancement Utilising Single-Phase Unified Power Quality Conditioner: Digital Signal Processor-Based Experimental Validation," *IET Power Electronics*, vol. 4, n° 3, pp. 323–331, March 2011.
- [14] H. Fujita, H. Akagi, "The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series and Shunt Active Filters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 13, n° 2, pp. 315-322, March 1998.
- [15] M. Aredes, K. Heumann, E.H. Watanabe, "A Universal Active Power Line Conditioner", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, n° 2, pp. 545-551, April 1998.
- [16] R. J. M. Santos, J. C. Cunha, M. Mezaroba, "A Simplified Control Technique for a Dual Unified Power Quality Conditioner", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, n° 11, pp. 5851–5860, November 2014.
- [17] B. W. França, L. F. Silva, M. A. Aredes, M. Aredes, "An Improved iUPQC Controller to Provide Additional Grid-Voltage Regulation as a STATCOM," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, n° 3, pp. 1345-1352, March 2015.
- [18] R. A. Modesto, S. A. O. Silva, A. A., Oliveira Jr., V. D. Bacon, "Versatile Unified Power Quality Conditioner Applied to Three-Phase Four-Wire Distribution Systems Using a Dual Control Strategy," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, n° 8, pp. 5503-5514, August 2016.
- [19] V. D. Bacon, S. A. O. Silva, L. B. G. Campanhol, B. A. Angélico, "Stability Analysis and Performance Evaluation of a Single-Phase Phase-Locked Loop Algorithm Using a Non-Autonomous Adaptive Filter", *IET Power Electronics*, vol. 7, n° 8, pp. 2081-2092, August 2014.
- [20] S. A. O. Silva, R. A. Modesto, "A Comparative Analysis of SRF-based Controllers Applied to Active Power Line Conditioners", in *Proc. of 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp.405-410, 2008.
- [21] R. Barriviera, S. A. O. Silva, R. S. Kaster, R. A. Modesto, "Implementação de um Sistema UPS Monofásico com Condicionamento Ativo de Potência Série e Paralelo", *Eletrônica de Potência –SOBRAEP*, vol. 17, n° 4, pp. 753-762, Setembro/Novembro, 2012.
- [22] B. A. Angélico, L. B. G. Campanhol, S. A. O. Silva, "Proportional-Integral /Proportional-Integral-Derivative Tuning Procedure of a Single-Phase Shunt Active Power Filter Using Bode Diagram," *IET Power Electronics*, vol. 8, n° 9, pp. 1–13, August 2014.
- [23] *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*, IEEE Std. 1469-2010, 2010.

DADOS BIOGRÁFICOS

Sérgio Augusto Oliveira da Silva é engenheiro eletricitista (1987), mestre em engenharia elétrica (1989) pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e doutor em engenharia elétrica (2001) pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Atualmente é professor titular do departamento de engenharia elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Cornélio Procópio (UTFPR-CP), onde também coordena o Laboratório de Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia e Energias Renováveis (LEPQER). Suas áreas de interesse são: sistemas de energia ininterrupta, condicionadores de energia, sistemas de controle empregando DSC, qualidade de energia elétrica e sistemas de energia renováveis.

É membro da SOBRAEP e do IEEE-IES.

Fernando Alves Negrão é engenheiro eletricitista (2002) pela Universidade Estadual de Londrina (UEL) e mestre em engenharia elétrica (2016) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Cornélio Procópio (UTFPR-CP).

Desde 2014 é professor do curso de engenharia elétrica da Universidade Norte do Paraná (UNOPAR). Suas áreas de interesse são: condicionadores de energia, qualidade de energia elétrica, processamento digital de sinais e compatibilidade e interferência eletromagnética.

É membro da SOBRAEP.