

ESTRUTURA DE CONTROLE HIERÁRQUICO PARA O PARALELISMO DE UPS DE DUPLA CONVERSÃO COM EQUALIZAÇÃO DAS TEMPERATURAS DOS CAPACITORES DOS BARRAMENTOS CC

William A. Venturini, João Manoel Lenz, Henrique Jank, Fábio E. Bisogno, José R. Pinheiro
Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria – RS, Brasil
e-mail: williamventurini@gmail.com, joaomlenz@gmail.com, hiquejank@gmail.com, fbisogno@gmail.com, jrenespinheiro@gmail.com

Resumo – Este trabalho propõe uma estrutura de controle hierárquico que permite realizar a equalização das temperaturas internas dos capacitores de barramento de UPSs conectadas em paralelo. Os capacitores eletrolíticos, usualmente utilizados em barramentos CC, são um dos principais responsáveis por falhas em sistemas de conversão de energia, sendo que a vida útil destes componentes é sensível a elevadas temperaturas de operação. Neste sentido, com o intuito de aumentar a vida útil de sistemas ininterruptos de energia conectados em paralelo, este trabalho propõe a adição de uma malha de controle que, através da medição indireta das temperaturas das UPSs, gerencia a potência ativa que cada UPS deve fornecer, a fim de equalizar as temperaturas dos capacitores. Resultados *hardware-in-the-loop* são adquiridos considerando duas UPSs monofásicas de 10 kVA conectadas em paralelo e localizadas em ambientes com temperaturas distintas, comprovando o bom desempenho e a viabilidade da proposta.

Palavras-Chave – Controle Hierárquico, Fontes Ininterruptas de Energia, Gerenciamento Térmico, Paralelismo.

HIERARCHICAL CONTROL STRUCTURE FOR PARALLELISM OF DOUBLE CONVERSION UPS WITH EQUALIZATION OF THE DC-LINK CAPACITORS TEMPERATURES

Abstract – This paper proposes a hierarchical control structure that allows the thermal equalization among the DC-link capacitors of UPSs connected in parallel. The electrolytic capacitors typically used in DC-links are one of the main causes of failure in electronic equipment and the lifetime of this component is sensitive to high operating temperatures. In this sense, this work proposes the addition of a control loop with the objective to increase the lifetime of uninterruptible power systems. Through the estimation of the UPS's internal temperatures, the proposed control loop manages the active power that each UPS unit must provide to equalize the DC-link capacitors temperatures. *Hardware-in-the-loop* results are acquired considering two 10 kVA single-phase UPSs connected in parallel and located in places with different temperatures, proving the good performance and the feasibility of the proposal.

Keywords – Hierarchical Control, Parallelism, Thermal Management, Uninterruptible Power Supplies.

Artigo submetido em 15/04/2018. Primeira revisão em 14/05/2018. Aceito para publicação em 02/07/2018 por recomendação do Editor Marcello Mezaroba. <http://dx.doi.org/10.18618/REP.2018.4.0001>

I. INTRODUÇÃO

As fontes ininterruptas de energia (*Uninterruptible Power Supplies* – UPS) de dupla conversão são sistemas conectados entre a carga e a rede pública, de forma a garantir o fornecimento de energia elétrica com alta qualidade e de forma ininterrupta, disponibilizando uma tensão de saída regulada, mesmo para grandes variações da tensão de entrada ou frente a distúrbios e faltas provenientes da rede elétrica [1], [2]. Exigências por sistemas cada vez mais confiáveis, redundantes e com possibilidade de expansão da potência instalada, motivam a conexão de UPS em paralelo [3].

As técnicas de controle para o paralelismo de inversores podem ser classificadas de acordo com a existência ou não de comunicação entre as unidades [4]. Os métodos sem comunicação, considerados mais robustos, são baseados no controle por inclinação (*droop*) [5]. Este método é derivado do controle de sistemas elétricos de potência, sendo fundamentado na alteração linear da amplitude e da frequência da tensão de saída de forma a equiparar as potências fornecidas por cada inversor. Através dele, é possível obter uma alta confiabilidade do sistema sem qualquer interconexão entre os inversores, utilizando apenas medições de variáveis locais. Contudo, por ser baseada em desvios de amplitude e frequência, a regulação da tensão de saída do sistema é prejudicada.

A adequada operação do controle por inclinação depende fortemente das impedâncias de linha que conectam os inversores ao ponto de acoplamento comum (PAC). Em caso de discrepâncias entre as impedâncias de linha, o compartilhamento de potências é afetado e, quando alimentando cargas não-lineares, a distribuição das harmônicas entre os inversores pode ser prejudicada [6]. Para tornar o sistema menos sensível a diferenças nas impedâncias de linha, é usual a utilização de impedâncias virtuais, as quais modificam a referência da tensão de saída a partir da realimentação da corrente de saída, tornando o sistema mais amortecido sem a inserção de perdas [7].

Para compensar os desvios provocados pelo controle por inclinação, técnicas de controle hierárquico podem ser empregadas [8]-[14]. Estas técnicas são utilizadas para padronizar e expandir a funcionalidade de microrredes [8] através da divisão da estrutura de controle dos inversores em níveis com diferentes bandas passantes e responsáveis por atribuições distintas. Quando aplicadas ao paralelismo de UPSs, é possível reduzir os erros de amplitude e frequência em regime permanente, equalizar as potências fornecidas pelas unidades e, ainda, obter informações relativas ao sincronismo com a rede ou com as demais unidades [15], [16].

Conversores operando em paralelo, mesmo com um compartilhamento adequado de potências, estão sujeitos a

dinâmicas térmicas distintas, sejam pela localização física do sistema, discrepâncias entre as tecnologias dos componentes, ou por variações dos parâmetros internos provocadas pelo desgaste de diferentes horas de operação. De acordo com [17], a vida útil dos capacitores eletrolíticos de alumínio (Al-Caps), amplamente utilizados em barramentos CC de conversores, é reduzida exponencialmente com a elevação da temperatura de operação. Estes componentes são responsáveis por cerca de 50% das falhas em componentes eletrônicos [18], sendo assim apontados como um dos obstáculos na redução de taxas de falha e elevação da confiabilidade de sistemas [19], [20].

Em UPSs, o barramento CC é projetado de acordo com o *hold-up time* – período de tempo que o conversor é capaz de prover energia para a carga após uma falta do sistema de alimentação principal – [21], [22]. Usualmente, é adotado um *hold-up time* maior que 17 ms para sistemas conectados em rede de 60 Hz, o que representa um grande volume de Al-Caps utilizados no barramento CC de UPSs [23]. Neste contexto, devido à importância dos elementos capacitivos em UPSs de dupla conversão, é evidente a relação da confiabilidade total do sistema com a vida útil dos capacitores de barramento.

O presente trabalho propõe uma estrutura de controle hierárquico com uma malha específica para a equalização das temperaturas dos capacitores de barramento de UPSs de dupla conversão conectadas em paralelo. Esta malha de controle está localizada no nível mais externo e com a menor banda passante; ela atua na distribuição das potências fornecidas pelas UPSs a partir da estimativa da temperatura de operação dos capacitores, de forma que unidades com maior estresse térmico forneçam menos potência à carga, e vice-versa. Com isso, esta proposta se destaca dos métodos discutidos anteriormente por, além de mitigar os desvios de amplitude e frequência causados pelo *droop*, reduzir a temperatura dos capacitores em estresse elevado e obter um melhor gerenciamento térmico entre as unidades em regime permanente. É considerado o caso de duas UPSs de dupla conversão com conexão paralela, localizadas em ambientes distintos e alimentando cargas distribuídas. Apesar do estudo ser baseado em um sistema constituído por duas UPSs em paralelo, a estrutura de controle proposta pode ser facilmente expandida e utilizada para o paralelismo com um número maior de unidades.

II. UPS MONOFÁSICA DE DUPLA CONVERSÃO

A topologia UPS de dupla conversão monofásica utilizada neste trabalho é composta pelo estágio de entrada com dupla funcionalidade proposto em [24] e por um inversor meia-ponte com filtro LC, conforme mostra a Figura 1.

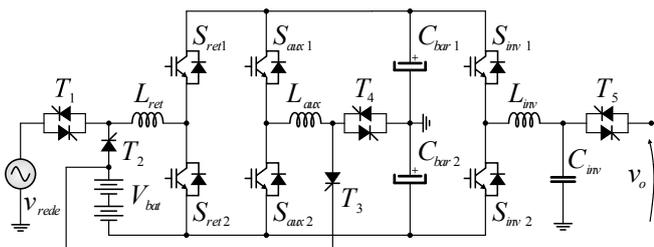


Fig. 1. Topologia da UPS de dupla conversão monofásica utilizada no paralelismo.

As chaves de transferência ($T_{1,2,3,4,5}$) são responsáveis por conectar e desconectar partes do circuito de acordo com o modo de operação do sistema: rede, bateria ou *bypass*. O neutro da rede é conectado à carga e ao ponto central do barramento CC. Os interruptores $S_{ret1,2}$, $S_{aux1,2}$ e $S_{inv1,2}$ são os IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) do retificador, circuito auxiliar e inversor, respectivamente.

Em modo rede de operação, o qual ocorre quando a tensão da rede (v_{rede}) está dentro de limites preestabelecidos, o indutor L_{ret} é conectado à rede, e o circuito de entrada é utilizado para a correção do fator de potência, regulação da tensão total de barramento (v_{bar}) e equilíbrio das tensões sobre os capacitores do barramento CC (C_{bar1} e C_{bar2}). Em modo bateria, o indutor L_{ret} é desconectado da rede e conectado ao terminal positivo do banco de baterias, e o circuito de entrada é responsável por manter a tensão de barramento regulada. A tensão V_{bat} é a tensão do banco de baterias.

O circuito auxiliar, através do indutor L_{aux} , é responsável pela carga do banco de baterias em modo rede de operação da UPS e pela equalização das tensões sobre os capacitores de barramento em modo bateria. O inversor sintetiza uma tensão senoidal na saída (v_o) com baixa distorção harmônica total em ambos os modos de operação. L_{inv} e C_{inv} são o indutor e o capacitor do filtro de saída do inversor, respectivamente.

Neste trabalho, para a análise do paralelismo, é considerado que as malhas internas de tensão e corrente estão adequadamente projetadas e são capazes de seguir a referência de tensão provida pelo controle primário e pelas ações de controle provenientes dos controladores mais externos, bem como rejeitar possíveis distúrbios. Uma análise mais aprofundada sobre a topologia UPS utilizada neste trabalho é encontrada em [25].

A Figura 2 apresenta o diagrama geral do paralelismo de UPSs, o qual inclui a rede elétrica, as unidades UPS de dupla conversão, as impedâncias de linha (Z_L), o PAC e as cargas distribuídas. As impedâncias de linha são observadas entre as saídas dos inversores e o PAC devido ao comprimento dos condutores que conectam as UPSs ao barramento CA.

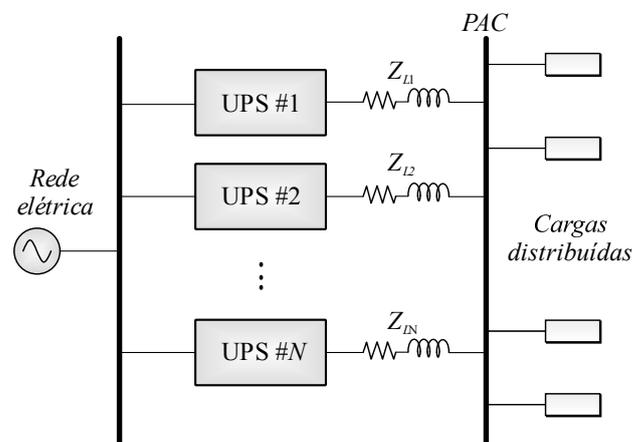


Fig. 2. Operação paralela de N UPSs de dupla conversão. Cargas distribuídas conectadas ao barramento CA.

III. MODELAGEM E ANÁLISE DE CAPACITORES

Dentre os tipos de capacitores utilizados para a aplicação em barramentos CC, os capacitores eletrolíticos de alumínio são uma das opções mais usuais por possuírem o menor custo por joule e a maior densidade de energia [27]. Contudo, possuem valores relativamente altos de resistência série equivalente (ESR – *Equivalent Series Resistance*) e baixa tolerância de corrente. O valor da ESR em Al-Caps varia de forma não-linear, sendo função tanto da frequência quanto da temperatura de operação. Portanto, para o cálculo de perdas e estimativa de temperatura realizados neste trabalho, a ESR foi modelada em função destes parâmetros utilizando informações fornecidas pelo fabricante [26].

A. Análise da Vida Útil de Capacitores

A vida útil de cada capacitor do barramento CC pode ser estimada em horas, em função da temperatura e da tensão de operação, a partir da equação de Arrhenius [27]:

$$VU = VU_0 \left(\frac{V_{cap}}{V_{cap0}} \right)^{-\varepsilon} \times e^{\left(\frac{E_a}{K_B} \right) \left(\frac{1}{T_{cap} + 273,15} - \frac{1}{T_{cap0} + 273,15} \right)} \quad (1)$$

onde VU_0 é a vida útil em condição nominal de teste, V_{cap} e V_{cap0} são a tensão de operação e a tensão de teste, respectivamente, T_{cap} e T_{cap0} são a temperatura de operação e a temperatura de teste em graus Celsius, respectivamente, E_a é a energia de ativação, K_B é a constante de Boltzmann ($8,62 \times 10^{-5}$ eV/K) e ε é o fator de estresse de tensão. Para capacitores eletrolíticos de alumínio, E_a e ε são definidos como 0,94 eV e 4 [27], respectivamente. A Figura 3 mostra de forma gráfica a redução da vida útil de Al-Caps, em porcentagem, de acordo com a variação da temperatura de operação e da tensão do capacitor, considerando $V_{cap0} = 350$ V e $T_{cap0} = 75$ °C.

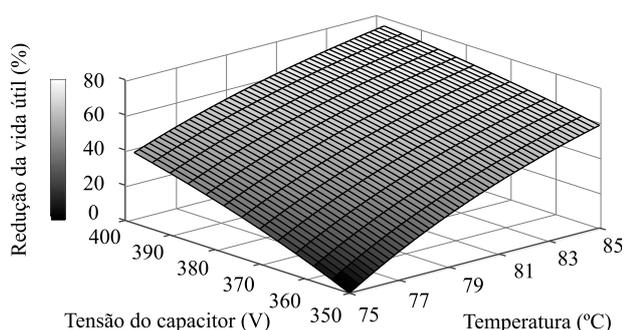


Fig. 3. Estimativa de redução da vida útil de capacitores eletrolíticos de alumínio em função da tensão e temperatura de operação.

É possível observar que, para uma mesma tensão de operação, um aumento de 10° C na temperatura de operação dos capacitores pode reduzir em mais de 60% a vida útil desses componentes. Dessa forma, fica evidente a sensibilidade da vida útil de capacitores eletrolíticos com relação à temperatura de operação.

B. Modelo Elétrico dos Capacitores do Barramento CC

O modelo elétrico simplificado de um Al-Cap pode ser descrito por sua capacitância (C), ESR e indutância série equivalente (ESL – *Equivalent Series Inductance*) [27], como mostra a Figura 4.

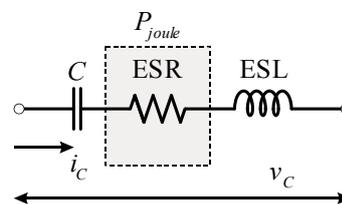


Fig. 4. Modelo elétrico dos capacitores do barramento CC.

Para operações abaixo da sua frequência de ressonância, a ESL pode ser desprezada e as perdas joule do capacitor podem ser calculadas em função apenas da ESR. Assumindo que a tensão do barramento CC é controlada e constante em regime permanente e considerando que todos os capacitores são idênticos, a corrente total do barramento CC (i_{CC}) se distribui igualmente entre um número de capacitores n_{cap} , sendo i_C a corrente de cada capacitor. As perdas joule de cada capacitor podem então ser obtidas por:

$$P_{joule} = \left(\frac{i_{CC}}{n_{cap}} \right)^2 \times ESR = i_C^2 \times ESR. \quad (2)$$

C. Modelo Térmico dos Capacitores do Barramento CC

Considerando que UPSs geralmente operam com pouca variação de carga no tempo, a análise térmica foi realizada apenas para a condição de regime permanente. O modelo térmico que relaciona a temperatura interna do capacitor (T_{cap}), a temperatura do encapsulamento do capacitor (T_{case}), a temperatura do dissipador (T_{HS}) e a temperatura ambiente (T_{amb}) é apresentado na Figura 5 [28].

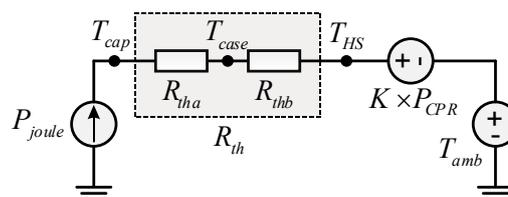


Fig. 5. Modelo térmico dos capacitores do barramento CC.

Na Figura 5, R_{tha} é a resistência térmica entre o núcleo e o encapsulamento, R_{thb} é a resistência térmica entre o encapsulamento e o dissipador, R_{th} é a resistência térmica total e K é o coeficiente de dissipação de calor da UPS, obtido de [28]. P_{CPR} é a relação de consumo de potência, dado por:

$$P_{CPR} = \frac{(1-\eta) P_o}{\eta P_{nom}} \quad (3)$$

sendo η o rendimento e P_o a potência de saída da UPS. Neste trabalho é considerado o rendimento de um modelo comercial de UPS de dupla conversão monofásica de 10 kVA [29], cuja curva de rendimento é mostrada na Figura 6.

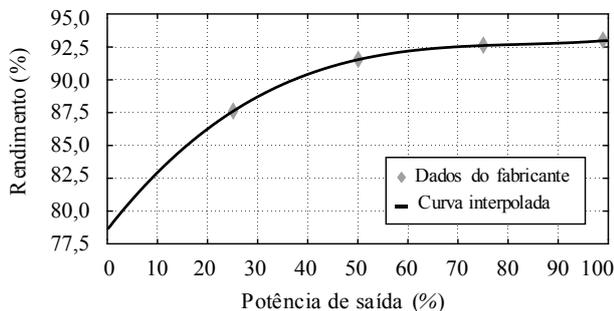


Fig. 6. Curva de rendimento das UPSs analisadas.

A partir do modelo mostrado na Figura 5, a temperatura do núcleo dos capacitores pode ser obtida por:

$$T_{cap} \approx (P_{joule} \times R_{th}) + (K \times P_{CPR}) + T_{amb}. \quad (4)$$

Substituindo (2) e (3) em (4), tem-se:

$$T_{cap} \approx (i_c^2 \times ESR \times R_{th}) + (K \times \frac{(1-\eta)}{\eta} \frac{P_o}{P_{nom}}) + T_{amb}. \quad (5)$$

Nela é observado que com o aumento da potência de operação da UPS, uma maior energia é dissipada no barramento CC e um conseqüente aumento das temperaturas dos núcleos dos capacitores. A literatura mostra que o mecanismo de falha mais comum dos Al-Caps é a vaporização de seu elemento eletrolítico, causada principalmente por sua temperatura de operação [18]. Logo, elevados valores de T_{cap} , aliados à longos períodos de operação – que é uma característica típica das UPSs de dupla conversão – podem resultar em maior degradação e redução da vida útil dos capacitores de barramento [30]. Dessa forma, ao equalizar as temperaturas dos capacitores de barramento através do gerenciamento de potências, o controle proposto neste trabalho equaliza, também, os estresses térmicos e a vida útil dos barramentos CC.

D. Aquisição das Temperaturas dos Capacitores de Barramento

As informações referentes às temperaturas dos capacitores de barramento das UPSs para a utilização na proposta do trabalho podem ser obtidas a partir dos seguintes métodos:

1) *Medição direta das temperaturas dos encapsulamentos dos capacitores de barramento:* exige a adição de sensores de temperatura em pontos específicos, de forma a obter a temperatura média dos capacitores. São necessárias entradas analógicas proporcionais ao número de sensores [31];

2) *Estimativa das temperaturas de barramento a partir das medições existentes da corrente de entrada e corrente do indutor de saída, e das informações dos sinais de controle dos interruptores:* esta alternativa não eleva o custo do sistema, contudo é necessária uma amostragem elevada para reproduzir de forma adequada as componentes de alta frequência das correntes dos capacitores [18], [32].

3) *Estimativa das temperaturas de barramento a partir da medição da corrente total de barramento:* é necessária a adição de sensores de corrente com elevada banda passante, o que pode ser obtido através de circuitos integrados de baixo custo específicos para medição de valores eficazes de corrente [33], [34];

Neste trabalho são estimadas as temperaturas das UPSs a partir das medições das correntes totais de barramento. Dessa forma, é possível a implementação da equalização de temperaturas na plataforma HIL, sem a necessidade de utilização de sensores de temperatura. A Figura 7 apresenta o fluxograma do algoritmo utilizado para a estimativa das temperaturas dos capacitores de barramento.

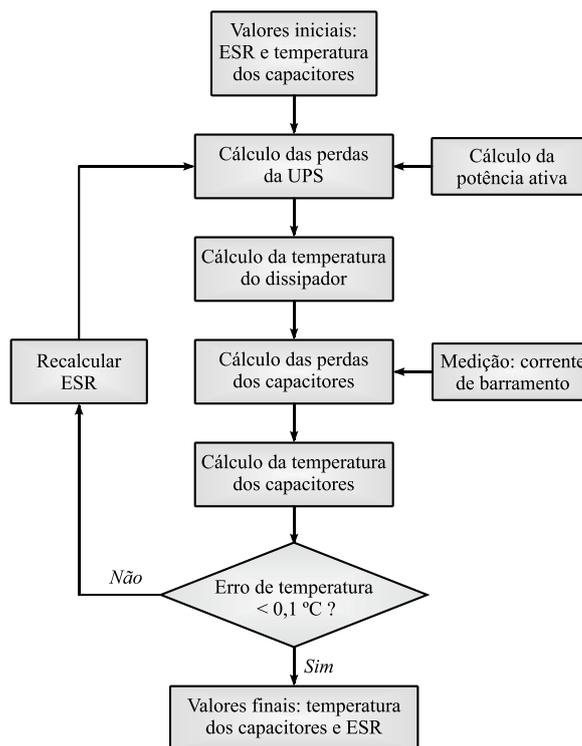


Fig. 7. Fluxograma do algoritmo de cálculo das temperaturas dos capacitores de barramento.

IV. ESTRUTURA DO CONTROLE HIERÁRQUICO PROPOSTO COM EQUALIZAÇÃO DE TEMPERATURAS

O controle hierárquico proposto neste trabalho é composto pelos níveis 0, 1, 2 e 3. O nível 0 possui as bandas passantes mais elevadas do sistema proposto, e é constituído pelas malhas internas de controle de corrente e de tensão, contando ainda com a adição da impedância virtual resistiva. A malha de corrente é utilizada para estabelecer uma pré-compensação da planta e para possibilitar a limitação de corrente em caso de sobrecarga ou curto-circuito. A malha de tensão, mais externa, é responsável por rastrear a referência de tensão senoidal e rejeitar distúrbios de carga. O nível 1 é ocupado pelo controle por inclinação, o qual compartilha a potência da carga entre as UPSs através dos desvios de amplitude e frequência da tensão de saída, sem a necessidade de comunicação entre as unidades. O nível 2 é formado pelo controle secundário que, a partir de uma comunicação com uma taxa de transferência de dados

relativamente baixa (1 Mbit/s) entre as unidades, regula a amplitude e a frequência da tensão de saída de referência nos valores nominais, corrigindo os erros impostos pelo nível 1, além de gerenciar as potências ativas fornecidas pelas unidades. O nível 3, mais externo e mais lento, é utilizado para a equalização das temperaturas dos capacitores de barramento, fazendo uso também do barramento de dados. A Figura 8 apresenta a estrutura de controle proposta.

A implementação do controle pode ser realizada de forma centralizada, utilizando um controlador específico externo às UPSs. Contudo, todo o funcionamento do sistema é dependente da comunicação entre as unidades e em caso de falha do controlador ou da comunicação a operação do sistema é interrompida [9]. Neste trabalho a implementação do controle é descentralizada e os cálculos são realizados internamente pelas UPSs. Dessa forma, em caso de falha da comunicação, os controladores secundários e terciários são desabilitados e o sistema continua operando através do controle por inclinação, porém com um desempenho inferior quanto a regulação da tensão de saída e gerenciamento térmico.

A Figura 9 apresenta as curvas de funcionamento do controle hierárquico proposto, onde são mostradas as relações da amplitude da tensão de saída com a potência ativa, Figura 9.a, e da frequência da tensão de saída com a potência reativa, Figura 9.b. Enquanto o controle por inclinação altera o ponto de operação no sentido horizontal, os níveis 2 e 3 modificam verticalmente as curvas, restaurando os valores nominais de tensão e gerenciando as potências das UPSs de acordo com informações da malha de equalização de temperaturas.

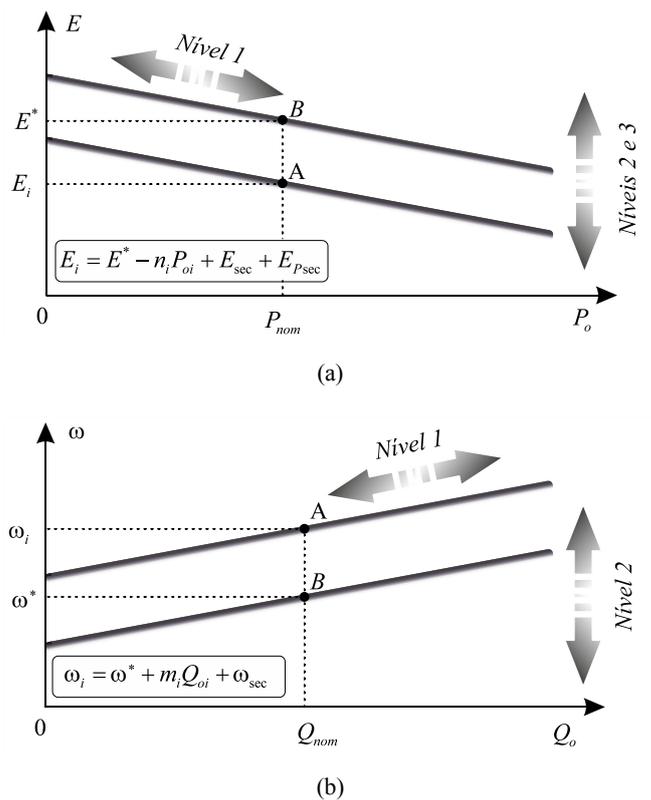


Fig. 9. Curvas características do funcionamento do controle hierárquico proposto: (a) Amplitude em função da potência ativa, (b) Frequência em função da potência reativa.

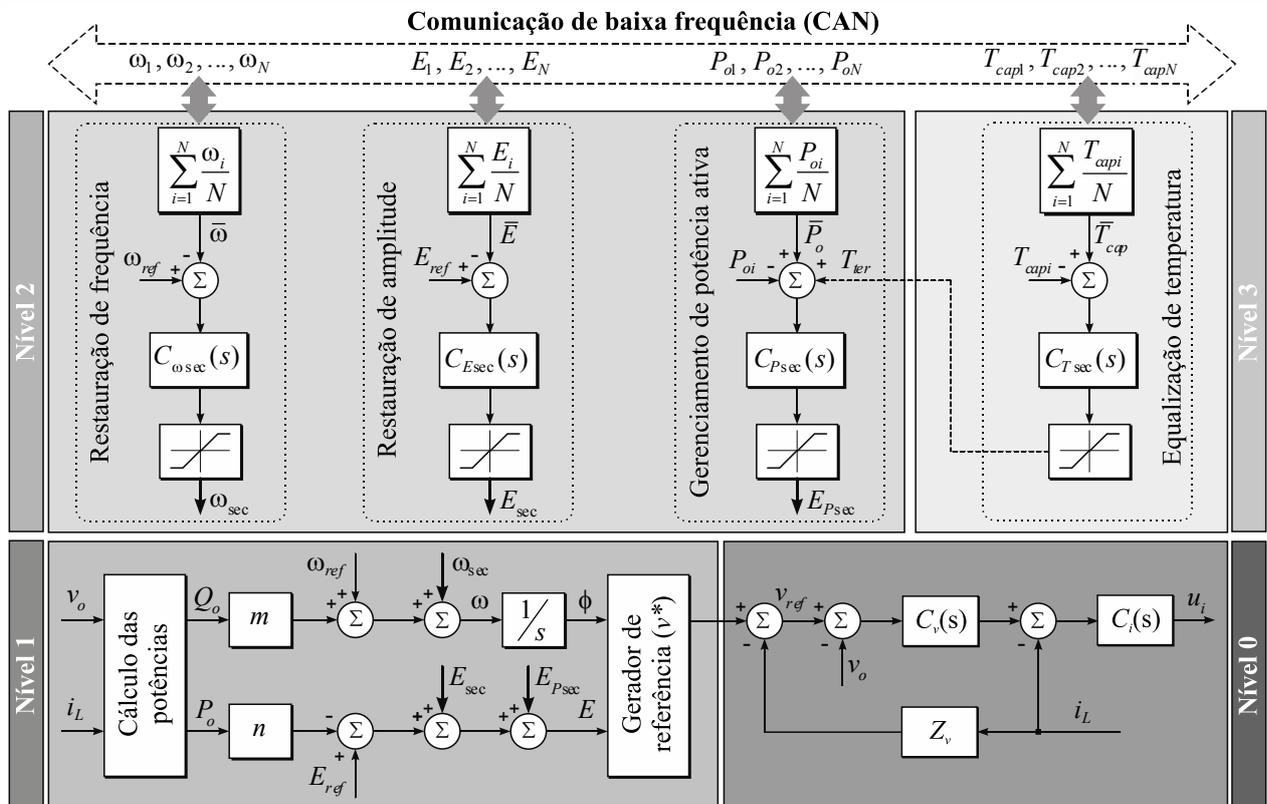


Fig. 8. Estrutura do controle hierárquico proposto com restaurações de frequência, amplitude e equalização das temperaturas dos capacitores dos barramentos CC.

A. Nível 1: Controle por Inclinação

O controle por inclinação permite obter uma alta confiabilidade do sistema sem qualquer interconexão entre os inversores, utilizando apenas medições de variáveis locais, tensão no capacitor (v_o) e corrente no indutor (i_L) do filtro de saída. É frequentemente utilizado em microrredes para tornar o sistema mais amortecido e garantir a estabilidade [5].

A impedância de saída (Z_o) dos inversores é geralmente considerada indutiva, principalmente devido às componentes indutivas da impedância de linha e dos filtros de saída. Contudo, a impedância de saída de malha fechada depende também da estratégia de controle e, em redes de baixa tensão, a impedância de linha (Z_L) é predominantemente resistiva [4]. A Figura 10 mostra o circuito equivalente de um inversor conectado ao barramento CA através de sua impedância de saída.

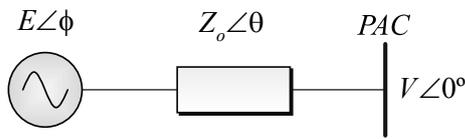


Fig. 10. Circuito equivalente de um inversor conectado ao barramento CA.

onde:

- E - amplitude da tensão do inversor;
- V - amplitude da tensão do barramento CA;
- ϕ - ângulo da tensão sintetizada pelo inversor;
- θ - ângulo da impedância de saída;
- Z_o - magnitude da impedância de saída.

Considerando uma impedância de saída com componente resistiva R e reativa indutiva X , o fluxo de potência ativa (P_o) e reativa (Q_o) de cada inversor para o barramento CA é dado por:

$$P_o = \frac{1}{R^2 + X^2} (RE^2 - REV \cos(\phi) + XEV \sin(\phi)) \quad (6)$$

$$Q_o = \frac{1}{R^2 + X^2} (XE^2 - XEV \cos(\phi) - REV \sin(\phi)) \quad (7)$$

Nelas podem ser simplificadas assumindo uma pequena diferença de fase entre E e V , o que resulta nas aproximações $\sin \phi \approx \phi$ e $\cos \phi \approx 1$. Considerando a impedância de saída resistiva, e adicionando filtros passa-baixas para as medições de potências, o controle por inclinação convencional pode ser implementado a partir das seguintes equações [5]:

$$E_i = E_{ref} - n_i \frac{\omega_c}{s + \omega_c} P_{oi} \quad (8)$$

$$\omega_i = \omega_{ref} + m_i \frac{\omega_c}{s + \omega_c} Q_{oi} \quad (9)$$

onde:

- E_{ref} - amplitude da tensão de referência;
- i - índice que representa cada UPS;
- n - coeficiente *droop* de amplitude;
- m - coeficiente *droop* de frequência;

- ω - frequência da tensão de saída;
- ω_{ref} - frequência da tensão de referência;
- ω_c - frequência de corte do filtro passa-baixas.

Quanto maiores forem os coeficientes *droop*, melhor será o compartilhamento de potência, ao custo de degradar a regulação de amplitude e frequência [5], [6]. Usualmente, os coeficientes *droop* são projetados de acordo com o desvio de amplitude (δE) e desvio de frequência ($\delta \omega$) permitidos para as potências ativa (P_{nom}) e reativa (Q_{nom}) nominais, conforme:

$$n = \delta E / P_{nom} \quad (10)$$

$$m = \delta \omega / Q_{nom} \quad (11)$$

Valores usuais de δE e $\delta \omega$ são 5% e 2%, respectivamente [4].

Contudo, as equações (8) e (9) são válidas para uma impedância de saída fortemente resistiva. Devido ao acoplamento entre as potências ativa e reativa mostrado em (6) e (7), essa condição não é garantida. Para impor uma característica específica à impedância de saída, uma abordagem típica é a inclusão de uma impedância virtual (Z_v) no sistema de controle [5], [10], de acordo com:

$$v_{ref} = v^* - Z_v(s) i_L \quad (12)$$

onde v_{ref} é a referência de tensão do inversor e v^* é a referência de tensão gerada pelo controlador primário. Neste trabalho é adicionada uma impedância virtual com característica resistiva, de valor 0,5 Ω .

B. Nível 2: Controle Secundário

Apesar do controle por inclinação ser amplamente utilizado, seu funcionamento é baseado nos desvios da amplitude e da frequência da tensão da microrrede, os quais são dependentes da carga. De forma a minimizar os problemas ocasionados pela utilização do controle por inclinação, o controle secundário é incluído. O controle secundário utiliza uma comunicação com baixa taxa de transferência de dados e é responsável por reduzir os erros de amplitude e frequência da tensão de saída em regime permanente, sem comprometer o compartilhamento de potências. Uma malha é utilizada para realizar o gerenciamento das potências ativas fornecidas pelas UPSs.

1) *Restaurações de amplitude e frequência:* Para as restaurações de frequência e amplitude, o controlador secundário recebe as variáveis das demais UPSs via comunicação, calcula a média aritmética, e com isso determina o desvio em relação aos respectivos valores de referência (ω_{ref} e E_{ref}). As ações de controle da restauração de frequência (ω_{sec}) e de amplitude (E_{sec}) são calculadas por:

$$\omega_{sec} = k_{p\omega} (\omega_{ref} - \bar{\omega}) + k_{i\omega} \int (\omega_{ref} - \bar{\omega}) dt \quad (13)$$

$$E_{sec} = k_{pE} (E_{ref} - \bar{E}) + k_{iE} \int (E_{ref} - \bar{E}) dt \quad (14)$$

onde k_p é o ganho proporcional, k_i é o ganho integral e $\bar{\omega}$ e \bar{E} são as médias aritméticas das frequências e amplitudes de todos os inversores conectados ao barramento CA, respectivamente.

2) *Gerenciamento de potência ativa*: Utilizando a restauração de amplitude é possível manter a média das tensões de saída dos inversores reguladas no valor de referência. Contudo, na presença de impedâncias de linhas diferentes, as potências ativas fornecidas pelos inversores diferem, e o compartilhamento de potência é afetado. Para reduzir a influência das impedâncias de linha no compartilhamento de potência, a malha de gerenciamento de potência ativa é incluída [9].

Nesta malha, as médias das potências ativas de saída de cada inversor são recebidas através da comunicação, e a média destes valores (\bar{P}_o) é utilizada como referência. Assim, é calculado o desvio em relação à potência medida pela UPS e é gerada a ação de controle da malha de potência ativa:

$$E_{Psec} = k_{pP}(\bar{P}_o - P_{oi}) + k_{iP} \int (\bar{P}_o - P_{oi}) dt. \quad (15)$$

A (15) representa a ação de controle que atua no sentido de igualar as potências fornecidas pelas UPSs, o que representa um compartilhamento de potência ideal. Contudo, a proposta deste trabalho faz uso da malha de gerenciamento de potência ativa para modificar a referência de potência das UPSs, de acordo com a ação de controle gerada pelo nível 3 do controle hierárquico, a qual é detalhada na próxima seção.

C. Nível 3: Equalização de Temperaturas

Através da utilização do controle por inclinação e das restaurações proporcionadas pelo controle secundário, é obtido um compartilhamento de potência adequado entre os inversores conectados em paralelo. Contudo, garantir uma distribuição de potência semelhante pode não ser a solução ideal.

Uma vez que a temperatura dos capacitores de barramento é relacionada com o quadrado da sua corrente eficaz e com as perdas térmicas do inversor, a sua temperatura de operação pode ser alterada através do controle da potência fornecida pela UPS. O nível 3 de controle recebe, via comunicação, os valores das estimativas das temperaturas das demais UPSs, calcula a média aritmética entre elas (\bar{T}_{cap}), e utiliza este valor como referência. A partir da \bar{T}_{cap} e da temperatura da unidade específica (T_{capi}), é calculado o desvio de temperatura que tende a ser zerado pela ação do controle da malha de equalização de temperatura do nível terciário (T_{ter}), conforme:

$$T_{ter} = k_{pT}(\bar{T}_{cap} - T_{capi}) + k_{iT} \int (\bar{T}_{cap} - T_{capi}) dt. \quad (16)$$

Esta ação de controle altera a referência da malha de gerenciamento de potência ativa no intuito de igualar as temperaturas dos capacitores de barramento das UPSs. A ação de controle da malha de potência ativa, considerando a malha de equalização de temperaturas é dada por:

$$E_{Psec} = k_{pP}(\bar{P}_o - P_{oi} + T_{ter}) + k_{iP} \int (\bar{P}_o - P_{oi} + T_{ter}) dt. \quad (17)$$

As ações resultantes do controle secundário, ω_{sec} , E_{sec} e E_{Psec} , são somadas na saída do controle primário para efetuar as respectivas restaurações. Dessa forma, as equações que representam a implementação dos controladores são dadas por:

$$E_i = E_{ref} - n_i \frac{\omega_c}{s + \omega_c} P_{oi} + E_{sec} + E_{Psec} \quad (18)$$

$$\omega_i = \omega_{ref} + m_i \frac{\omega_c}{s + \omega_c} Q_{oi} + \omega_{sec}. \quad (19)$$

É importante salientar que as restaurações de frequência e amplitude devem ser limitadas, de forma a não exceder os desvios limites preestabelecidos no projeto do controlador primário. De forma semelhante, a ação de controle da malha de gerenciamento de potência ativa não deve exceder as potências nominais das UPSs.

V. RESULTADOS *HARDWARE-IN-THE-LOOP*

O desempenho da estrutura de controle proposta é avaliado a partir da implementação em um equipamento *hardware-in-the-loop*, modelo Typhoon HIL402. Esta plataforma, que permite emular um circuito de potência, tem se popularizado na literatura e na indústria para a aquisição de resultados em tempo real com alta fidelidade, sendo uma alternativa que reduz o custo, o tempo de desenvolvimento e o *time-to-market*, principalmente para sistemas de potência elevada [25], [35]-[38]. O sistema de controle é implementado em DSPs da *Texas Instruments* modelo TMS320F28335. A Figura 11 apresenta a plataforma HIL utilizada para a aquisição dos resultados.



Fig. 11. Plataforma Typhoon HIL 402 utilizando DSPs da *Texas Instruments* TMS320F28335.

São conectadas em paralelo duas UPSs de 10 kVA, como descritas na Figura 1, alimentando cargas resistivas distribuídas que totalizam 10 kW através de diferentes impedâncias de linha. É assumido que as UPSs, apesar de estarem conectadas à mesma rede, estão localizadas fisicamente em ambientes distintos, com a UPS #1 exposta a uma temperatura ambiente de 30 °C e a UPS #2 confinada em um ambiente com temperatura controlada de 20 °C. As UPSs são consideradas idênticas, e com isso, as temperaturas dos capacitores de barramento dependem apenas da corrente eficaz dos barramentos CC e das temperaturas ambientes. Neste trabalho a banda passante do controle de nível 0 é de 2 kHz para a malha de corrente e 500 Hz para a malha de tensão. As bandas passantes dos níveis 1, 2 e 3 são 6 Hz, 1 Hz e 0,1 Hz, respectivamente. Estas escolhas são feitas de forma a garantir que uma malha mais interna tenha capacidade de sintetizar as referências geradas pelas malhas

mais externas [5], [9]. Os ganhos dos controladores de níveis 2 e 3 são obtidos através da modelagem de pequenos sinais em torno de um ponto de equilíbrio e da análise dos autovalores do sistema em malha fechada [5], [9], [13], os quais são ajustados para se obter uma resposta transitória subamortecida e assim evitar sobre-elevações. A Tabela I apresenta os dados gerais do sistema e os parâmetros de potência e de controle utilizados.

Inicialmente, são habilitados os níveis 0, 1 e 2 do controle hierárquico, de forma a validar a metodologia de projeto utilizada, sem a malha de equalização de temperaturas. A Figura 12.a apresenta as formas de onda da tensão de saída e da corrente no indutor do filtro de saída da UPS #1 e a Figura 12.b mostra as formas de onda da tensão de saída e da corrente no indutor do filtro de saída da UPS #2. Com os níveis 0, 1 e 2 do controle hierárquico habilitado, as tensões de saída são reguladas nos valores nominais e as UPSs fornecem cerca de 4,95 kW cada, o que representa um compartilhamento de carga ideal.

Contudo, devido às diferentes temperaturas ambientes onde as UPSs estão localizadas, as temperaturas internas dos capacitores de barramento da UPS #1 (T_{cap1}) e da UPS #2 (T_{cap2}) possuem valores distintos, com $T_{cap1} = 59,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_{cap2} = 43,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. De acordo com a análise realizada na seção III,

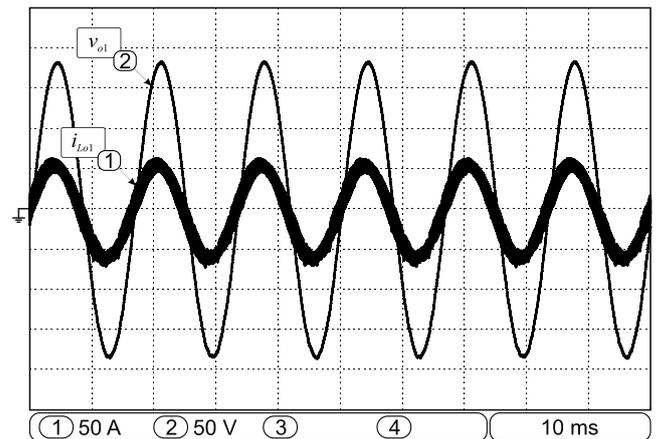
uma diferença de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ nas temperaturas dos capacitores de barramento das UPSs pode significar uma vida útil até 60% menor da UPS com temperatura maior. Na operação paralela, a falha de uma unidade pode representar a interrupção do fornecimento de energia para a carga crítica.

Nesse contexto, visando o aumento da vida útil e da confiabilidade do sistema, é adicionado o nível 3 do controle hierárquico proposto para a equalização de temperaturas. A Figura 13 apresenta a operação do sistema com a habilitação da malha de equalização de temperaturas. A Figura 13.a apresenta as formas de onda da tensão de saída e da corrente no indutor do filtro de saída da UPS #1 e a Figura 13.b mostra as formas de onda da tensão de saída e da corrente no indutor do filtro de saída da UPS #2. Os valores das correntes fornecidas pelas UPSs são alterados com o intuito de modificar as potências fornecidas pelas UPSs e consequentemente suas temperaturas internas. Assim, os valores eficazes das correntes dos indutores de saída passam a ser 24,6 A e 53,5 A, respectivamente da UPS #1 e UPS #2.

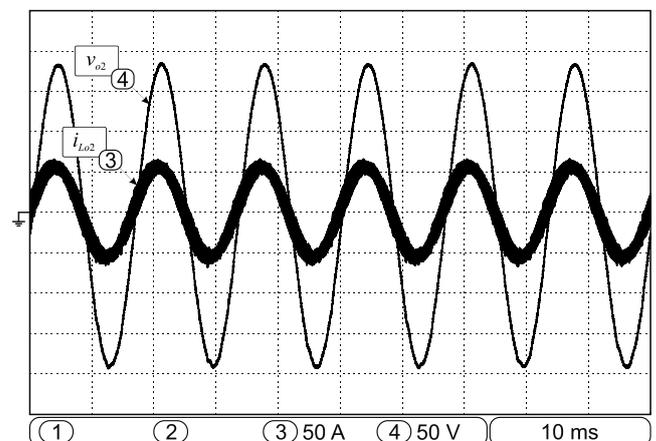
Na Figura 14 são mostrados os comportamentos das variáveis de interesse antes e depois da habilitação da malha de equalização de temperaturas. A Figura 14.a apresenta as potências ativas das UPSs #1 e #2 e a Figura 14.b mostra as temperaturas internas dos capacitores de

TABELA I
Parâmetros do Sistema

Parâmetro	Valor
Parâmetros gerais	
Potência da carga (P_L)	10 kW
Impedância de linha da UPS #1 (Z_{L1})	$0,05 + j\omega 0,01\text{ m}\Omega$
Impedância de linha da UPS #2 (Z_{L2})	$0,10 + j\omega 0,02\text{ m}\Omega$
Temperatura ambiente da UPS #1 (T_{amb1})	$30\text{ }^{\circ}\text{C}$
Temperatura ambiente da UPS #2 (T_{amb2})	$20\text{ }^{\circ}\text{C}$
Parâmetros de potência (por UPS)	
Tensão de fase da entrada/saída (V_i/V_o)	127 V / 60 Hz
Potência de saída (S_o)	10 kVA
Frequência de chaveamento (f_{sw})	15 kHz
Frequência de amostragem (f_s)	15 kHz
Tensão total de barramento (V_{bar})	225 V + 225 V
Capacitância total de barramento (C_{bar})	20000 μF
Capacitores de barramento (C)	10000 μF / 350 V
Resistência térmica total (R_{th})	$2,77\text{ }^{\circ}\text{C/W}$
Resistência série dos capacitores de barramento (ESR)	$36\text{ m}\Omega @ 60\text{ Hz}$
Coefficiente de dissipação de calor (K)	550
Indutor do filtro de entrada (L_{red})	225 μH
Capacitor do filtro de saída (C_o)	150 μF
Indutor do filtro de saída (L_o)	120 μH
Controladores primários (P)	
Coefficiente <i>droop</i> de amplitude (n)	0,0009
Coefficiente <i>droop</i> de frequência (m)	0,000189
Controladores secundários (PI)	
Restaurador de amplitude (C_{Esec})	$k_{pE} = 0,1; k_{iE} = 0,005$
Restaurador de frequência (C_{ossec})	$k_{p\omega} = 0,01; k_{i\omega} = 0,005$
Equalizador de potência ativa (C_{Psec})	$k_{pP} = 0,001; k_{iP} = 0,0001$
Controlador terciário (PI)	
Equalizador de temperatura (C_{Tsec})	$k_{pT} = 0,01; k_{iT} = 0,0001$



(a)



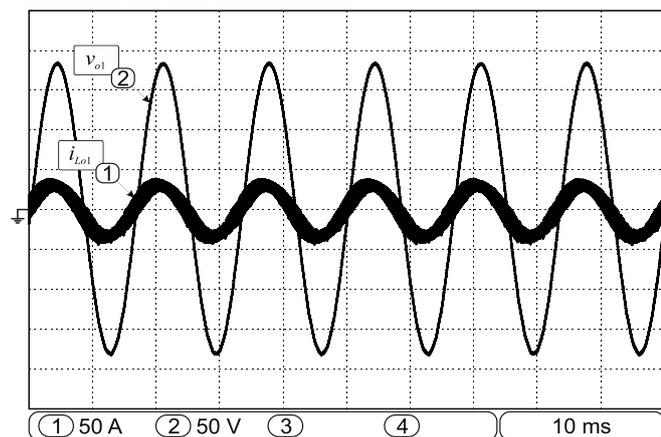
(b)

Fig. 12. Resultados HIL. Níveis 0, 1 e 2 habilitados. Tensão de saída e corrente do indutor do filtro de saída: (a) UPS #1, (b) UPS #2.

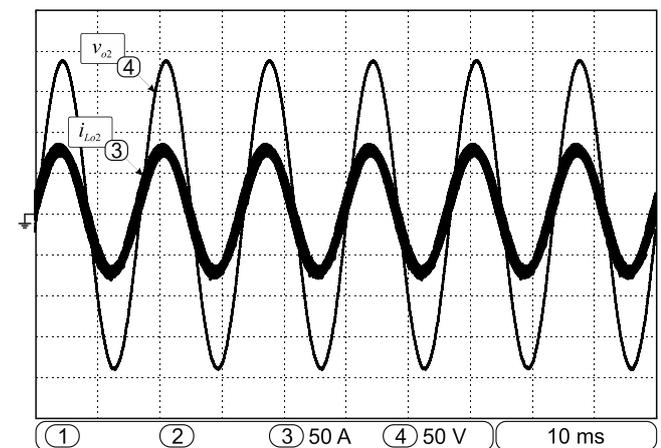
barramento de ambas as UPSs. Como as duas UPSs apresentam as mesmas características construtivas e a UPS #1 está em um ambiente com temperatura maior, a temperatura interna dos capacitores de barramento apresenta inicialmente um valor superior.

Para reduzir a temperatura de operação e atingir a igualdade térmica com a UPS #2, há uma redistribuição das potências fornecidas pelas UPSs, o que altera as correntes eficazes de barramento, a dissipação de calor resultante das perdas totais de cada unidade, e, conseqüentemente, as temperaturas dos capacitores. É ressaltado que não foram incluídas as dinâmicas térmicas do sistema, e o tempo decorrido até o regime permanente é proveniente da dinâmica lenta do controlador da equalização de temperaturas.

Apesar de a ação de controle ter como consequência a elevação de T_{cap2} , o principal objetivo desta proposta é reduzir o componente em condição de estresse elevado. Do ponto de vista global do sistema, o tempo para manutenção e substituição é prolongado, uma vez que o estresse térmico do componente crítico – presente na UPS #1 – é mitigado. O impacto desta ação de controle na estimativa de vida útil dos capacitores em cada cenário e o compromisso existente nessa escolha fogem do escopo deste artigo, mas serão analisados em trabalhos futuros.



(a)



(b)

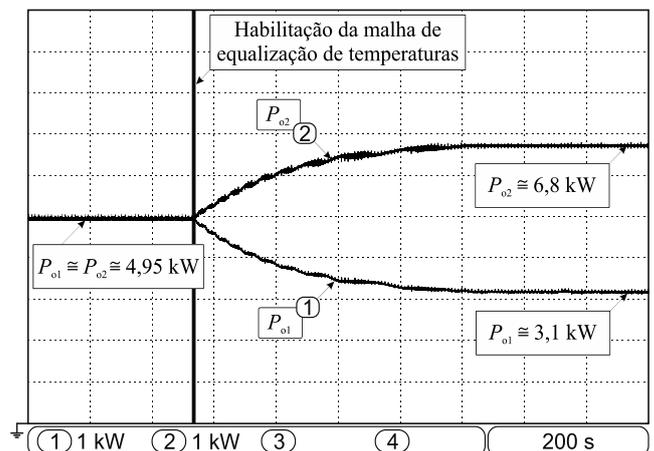
Fig. 13. Resultados HIL. Controle hierárquico proposto com equalização de temperaturas. Tensão de saída e corrente do indutor do filtro de saída: (a) UPS #1, (b) UPS #2.

VI. ANÁLISE DO RENDIMENTO GLOBAL DO SISTEMA

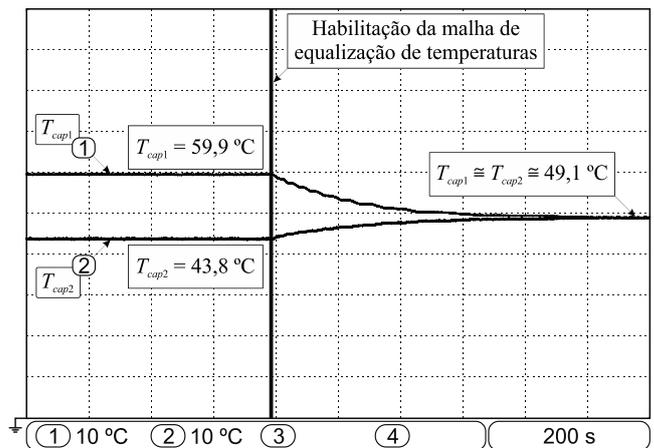
A estrutura de controle proposta neste trabalho tende a desequilibrar as potências fornecidas pelas UPSs com a finalidade de equalizar as temperaturas internas dos capacitores de barramento. O impacto da inclusão desta malha terciária no rendimento global (η_g) do sistema também foi analisado, para diferentes distribuições de potências entre as UPSs (F_d).

A análise do rendimento global é realizada de forma gráfica. É considerado que as UPSs são idênticas e apresentam a curva de rendimento da Figura 6. A potência especificada para cada UPS é igual à metade da potência nominal da carga, de forma que, para alimentar a carga nominal, é necessário que as duas UPSs estejam fornecendo suas potências nominais. Assim, as potências de saída das UPSs podem ser escritas em função da potência da carga (P_L) e de F_d , conforme:

$$P_{o1} = P_L F_d, \quad P_{o2} = P_L (1 - F_d). \quad (20)$$



(a)



(b)

Fig. 14. Resultados HIL. Controle hierárquico proposto com equalização de temperaturas: (a) Potências ativas de saída, (b) Temperaturas internas dos capacitores de barramento.

VII. CONCLUSÕES

O perfeito equilíbrio de potência entre as duas UPSs é obtido para F_d de 0,5; para $F_d = 0$ apenas a UPS #2 supre a carga e para $F_d = 1$ apenas a UPS #1. Onde as potências de entrada das UPSs são dadas por:

$$P_{i1} = \frac{P_{o1}}{\eta_1}, \quad P_{i2} = \frac{P_{o2}}{\eta_2} \quad (21)$$

sendo η_1 e η_2 são os rendimentos da UPS #1 e #2, respectivamente. O rendimento global do sistema, em função do fator de distribuição e da potência da carga pode ser dado por:

$$\eta_g = \frac{\frac{P_L F_d}{\eta_1} + \frac{P_L (1 - F_d)}{\eta_2}}{P_L F_d + P_L (1 - F_d)} \quad (22)$$

Normalizando as potências fornecidas pelas UPSs pela potência da carga, variando a distribuição de potência entre as UPSs e omitindo situações que excedam as potências nominais de cada unidade, é possível traçar as relações entre essas variáveis. A Figura 15 apresenta a relação entre o rendimento global do paralelismo de duas UPSs, a variação da carga e a distribuição de potência entre as unidades.

Para cargas de até cerca de 45% do valor nominal, quanto maior a diferença na distribuição de potência entre as UPSs, maior é o rendimento global do sistema. Considerando que usualmente o controle do paralelismo de inversores é realizado com o intuito de equiparar apenas as potências fornecidas, a malha de equalização de temperaturas proposta resulta em uma melhoria no rendimento do sistema, comparado aos métodos clássicos de controle, além do aumento da vida útil e da confiabilidade. Conforme a carga é aumentada, a possibilidade de gerenciamento de temperatura é reduzida, uma vez que as potências nominais das unidades não devem ser ultrapassadas. Caso o rendimento do sistema deva ser otimizado, a equalização de temperaturas pode ser habilitada apenas para potências específicas de carga. Contudo, é preciso analisar as curvas de rendimento específicas para cada topologia de UPS, de forma a encontrar a melhor faixa de operação do controle hierárquico proposto.

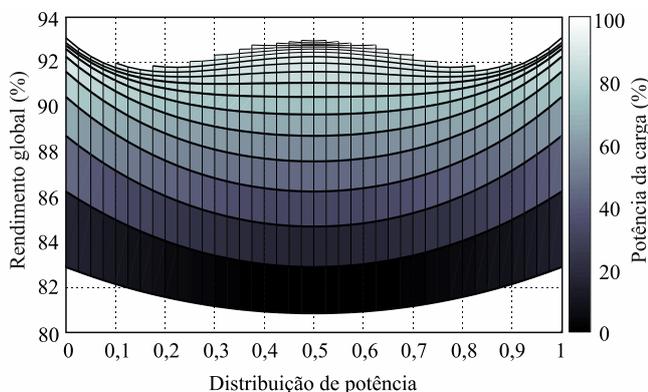


Fig. 15. Rendimento global do sistema considerando a variação da carga e a distribuição de potências entre as UPSs conectadas em paralelo.

Este trabalho apresentou como proposta uma estrutura de controle hierárquico para o paralelismo de UPSs de dupla conversão que, através da inclusão de uma malha de controle mais externa, possui como objetivo equalizar as temperaturas dos capacitores de barramento. O paralelismo dos inversores foi realizado com base no controle por inclinação associado ao controle secundário para mitigação dos desvios de amplitude e frequência, o qual utiliza uma comunicação com baixa taxa de transferência de dados para enviar e receber as variáveis de interesse. No nível mais externo, o controle proposto utilizou estimativas das temperaturas internas dos capacitores para alterar a referência de potência de cada UPS; o inversor exposto à uma temperatura ambiente maior teve sua potência fornecida reduzida de modo a diminuir o estresse térmico dos seus capacitores. Todo o controle é realizado de forma descentralizada, sem a necessidade de um controlador principal.

Dois UPSs de 10 kVA conectadas em paralelo e localizadas em ambientes com diferentes temperaturas foram analisadas e o desempenho da estrutura de controle proposta foi validado a partir de resultados obtidos em uma plataforma *hardware-in-the-loop*. A estrutura de controle proposta, após a habilitação da malha de equalização de temperaturas, compensou a diferença de 16 °C existente entre os capacitores de barramento de cada unidade UPS, através do gerenciamento das potências fornecidas por cada unidade. Para tal, as referências de potência foram alteradas em 1,85 kW para mais e para menos nas unidades com menor e maior estresse térmico, respectivamente. Ainda, para diversas condições de carga, o rendimento global do sistema aumenta com o uso da estrutura de controle proposta.

Além de permitir o aumento da vida útil e da confiabilidade do sistema, uma vez que os capacitores eletrolíticos de barramento são significativamente propensos à falha, a solução apresentada possui a vantagem de ser facilmente implementável, admitindo que a estrutura de controle do paralelismo já se encontra em operação. Por fim, estudos adicionais sobre o impacto da proposta do trabalho na vida útil dos capacitores, bem como a análise detalhada do projeto dos controladores e da estabilidade do sistema em malha fechada podem ser realizados.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq, CAPES, grupo LEGRAND e Typhoon HIL pelo suporte a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] *Uninterruptible power systems (UPS) Part 3: Method of specifying the performance and test requirements*, IEC 62040-3, 1999.
- [2] M. Aamir, S. Mekhilef, "An Online Transformerless Uninterruptible Power Supply (UPS) System With a Smaller Battery Bank for Low-Power Applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, n° 1, pp. 233-247, Janeiro 2017.
- [3] S. Tolani, P. Sensarma, "Extended Bandwidth Instantaneous Current Sharing Scheme for Parallel UPS Systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, n° 6, pp. 4960-4969, Junho 2017.

- [4] J. M. Guerrero, L. Hang, J. Uceda, "Control of Distributed Uninterruptible Power Supply Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, n° 8, pp. 2845-2859, Agosto 2008.
- [5] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. Vicuna, M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, n° 1, pp. 158-172, Janeiro 2011.
- [6] J. M. Guerrero, L. G. de Vicuna, J. Matas, M. Castilla, J. Miret, "Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, n° 4, pp. 1126-1135, Agosto 2005.
- [7] H. Han, Y. Liu, Y. Sun, M. Su, J. M. Guerrero, "An Improved Droop Control Strategy for Reactive Power Sharing in Islanded Microgrid", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, n° 6, pp. 3133-3141, Junho 2015.
- [8] L. Meng, Q. Shafiee, G. F. Trecate, H. Karimi, D. Fulwani, X. Lu, J. M. Guerrero, "Review on Control of DC Microgrids and Multiple Microgrid Clusters", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, n° 3, pp. 928-948, Setembro 2017.
- [9] Q. Shafiee, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, "Distributed Secondary Control for Islanded Microgrids—A Novel Approach", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, n° 2, pp. 1018-1031, Fevereiro 2014.
- [10] H. Han, X. Hou, J. Yang, J. Wu, M. Su, J. M. Guerrero, "Review of Power Sharing Control Strategies for Islanding Operation of AC Microgrids", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, n° 1, pp. 200-215, Janeiro 2016.
- [11] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho, J. M. Guerrero, "Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, n° 3, pp. 2427-2451, Março 2017.
- [12] W. F. de Souza, M. A. Severo-Mendes, L. A. C. Lopes, "Power sharing control strategies for a three-phase microgrid in different operating condition with droop control and damping factor investigation", *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, n° 9, pp. 831-839, Setembro 2015.
- [13] Y. Han, P. Shen, X. Zhao, J. M. Guerrero, "Control Strategies for Islanded Microgrid Using Enhanced Hierarchical Control Structure With Multiple Current-Loop Damping Schemes", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, n° 3, pp. 1139-1153, Maio 2017.
- [14] E. A. A. Coelho, D. Wu, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, T. Dragičević, Č. Stefanović, P. Popovski, "Small-Signal Analysis of the Microgrid Secondary Control Considering a Communication Time Delay", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, n° 10, pp. 6257-6259, Outubro 2016.
- [15] C. Zhang, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, E. A. A. Coelho, "Control Architecture for Parallel-Connected Inverters in Uninterruptible Power Systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, n° 7, pp. 5176-5188, Julho 2016.
- [16] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, M. Castilla, L. G. de Vicuna, "Control Strategy for Flexible Microgrid Based on Parallel Line-Interactive UPS Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, n° 3, pp. 726-736, Março 2009.
- [17] Z. Wang, Z. Xu, L. Zhao, S. Han, "Power Capacitor Temperature Measurement System Using FBG Sensors and Its Validation", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67, n° 2, pp. 449-458, Fevereiro 2018.
- [18] K. Abdennadher, P. Venet, G. Rojat, J. Retif, C. Rosset, "A Real-Time Predictive-Maintenance System of Aluminum Electrolytic Capacitors Used in Uninterrupted Power Supplies", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, n° 4, pp. 1644-1652, Julho/Agosto 2010.
- [19] Y. Song, B. Wang, "Survey on Reliability of Power Electronic Systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, n° 1, pp. 591-604, Janeiro 2013.
- [20] H. S. Chung, H. Wang, F. Blaabjerg, M. Pecht, *Reliability of Power Electronic Converter Systems*, Institution of Engineering and Technology, 2015.
- [21] P. C. Todd, UC3854 Controlled Power Factor Correction Circuit Design. Unitrode Product and Applications Handbook, pp. 10303-10322, 1996.
- [22] H. Wu, T. Mu, X. Gao, Y. Xing, "A Secondary-Side Phase-Shift-Controlled LLC Resonant Converter With Reduced Conduction Loss at Normal Operation for Hold-Up Time Compensation Application", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, n° 10, pp. 5352-5357, Outubro 2015.
- [23] Y. Lai, Z. Su, W. Chen, "New Hybrid Control Technique to Improve Light Load Efficiency While Meeting the Hold-up Time Requirement for Two-Stage Server Power", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, n° 9, pp. 4763-4775, Setembro 2014.
- [24] W. A. Venturini, H. Jank, M. L. S. Martins, F. E. Bisogno, H. Pinheiro, C. Rech, J. R. Pinheiro, A. G. Bueno, "A low cost three-phase transformerless online UPS", in *Proc. of COBEP*, pp. 1-6, 2015.
- [25] W. A. Venturini, H. Jank, F. E. Bisogno, M. L. Martins, H. Pinheiro, "Estágio de Entrada com Dupla Funcionalidade Aplicado a uma UPS Trifásica de Alto Desempenho", *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 23, n° 2, pp. 244-255, Abril 2018.
- [26] DCMC Datasheet, "Type DCMC 85 °C High Capacitance, Screw Terminal, Aluminum". [Online]. Disponível: <http://www.farnell.com/datasheets/1731347.pdf>.
- [27] H. Wang, F. Blaabjerg, "Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters—An Overview", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, n° 5, pp. 3569-3578, Outubro 2014.
- [28] Z. Zhang, L. Wang, S. Kurtz, J. Wu, P. Quan, R. Sorensen, S. Liu, J. B. Bai, Z. W. Zhu, "Operating Temperatures of Open-rack Installed Photovoltaic Inverters", *Solar Energy*, vol. 137, pp. 344-351, Novembro 2016.
- [29] ABB Technologies, "Technical Datasheet PowerValue 11/31 T 10-20 kVA", 2017. [Online]. Disponível: new.abb.com/ups/systems/single-phase-ups/powervalue-31-11-t.

- [30] Y. Yang, K. Ma, H. Wang, F. Blaabjerg, “Instantaneous Thermal Modeling of the DC-link Capacitor in PhotoVoltaic Systems”, in *Proc. of APEC*, pp. 2733-2739, 2015.
- [31] Z. Wang, Z. Xu, L. Zhao, S. Han, “Power Capacitor Temperature Measurement System Using FBG Sensors and Its Validation”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67, nº 2, pp. 449-458, Fevereiro 2018.
- [32] N. Agarwal, M. W. Ahmad, S. Anand, “Quasi-Online Technique for Health Monitoring of Capacitor in Single-Phase Solar Inverter”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, nº 6, pp. 5283-5291, Junho 2018.
- [33] E. Aeloiza, J.-H. Kim, P. Enjeti, P. Ruminot, “A Real Time Method to Estimate Electrolytic Capacitor Condition in PWM Adjustable Speed Drives and Uninterruptible Power Supplies”, in *Proc. of PESC*, pp. 2867-2872, 2005.
- [34] M. A. Vogelsberger, T. Wiesinger, H. Ertl, “Life-Cycle Monitoring and Voltage-Managing Unit for DC-Link Electrolytic Capacitors in PWM Converters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, nº 2, pp. 493-503, Fevereiro 2011.
- [35] H. Jank, W. A. Venturini, G. G. Koch, M. L. Martins, F. E. Bisogno, V. F. Montagner, H. Pinheiro, “Controle Baseado Em Um Lqr Com Estabilidade Robusta À Incerteza Paramétrica Aplicado A Um Carregador De Baterias”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 22, nº 4, pp. 408-417, Dezembro 2017.
- [36] R. Mo, H. Li, “Hybrid Energy Storage System With Active Filter Function for Shipboard MVDC System Applications Based on Isolated Modular Multilevel DC/DC Converter”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, nº 1, pp. 79-87, Março 2017.
- [37] A. S. Vijay, S. Doolla, M. C. Chandorkar, “Real-Time Testing Approaches for Microgrids”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, nº 3, pp. 1356-1376, Setembro 2017.
- [38] A. Hintz, U. R. Prasanna, K. Rajashekara, “Novel Modular Multiple-Input Bidirectional DC–DC Power Converter (MIPC) for HEV/FCV Application”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, nº 5, pp. 3163-3172, Maio 2015.

DADOS BIOGRÁFICOS

William Agravanci Venturini, nascido em 24/11/1990, possui graduação (2014) e mestrado (2016) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria. Atualmente cursa doutorado pela mesma instituição, onde desenvolve seus trabalhos no Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC). Durante o primeiro semestre de 2014, realizou estágio curricular junto ao Fraunhofer Institute - IZM, situado em Berlim - Alemanha, atuando na área de pesquisa e desenvolvimento de conversores estáticos. Suas principais áreas de interesse incluem modelagem e controle digital de sistemas, fontes ininterruptas de energia (UPS) e paralelismo de UPS. É membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP) e sociedades IEEE.

João Manoel Lenz, recebeu o grau de Bacharel e de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria, em 2013 e 2015, respectivamente. Atualmente realiza curso de Doutorado na linha de Eletrônica de Potência, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFSM. Realiza pesquisas com ênfase em energia fotovoltaica, confiabilidade em eletrônica de potência e projeto otimizado de conversores estáticos. Tem experiência em modelagem de células e sistemas fotovoltaicos, geração com fontes alternativas de energia e integração de fontes renováveis.

Henrique Jank, nascido em 16/04/1991, engenheiro eletricitista pela Universidade de Santa Cruz do Sul (2013), mestre pela Universidade Federal de Santa Maria (2016), atualmente cursa doutorado pela Universidade Federal de Santa Maria, onde atua como pesquisador no Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC). Seus interesses atuais de pesquisa incluem conversores estáticos, modelagem e controle, fontes ininterruptas de energia e paralelismo de inversores.

Fábio Ecke Bisogno, nascido em 07/04/1973 em Santa Maria, RS, é engenheiro eletricitista (1999) e mestre (2001) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria e doutor (2006) em Engenharia Elétrica pela Technische Universität Chemnitz. Paralelo com o doutorado esteve empregado no instituto de pesquisa Fraunhofer – AIS e depois Fraunhofer – IAIS e IZM, Alemanha. Atualmente é professor adjunto na Universidade Federal de Santa Maria. Suas principais áreas de interesse são: reatores eletrônicos, sistemas auto-oscilantes, transformadores piezolétricos, conversores ressonantes e fontes ininterruptas de energia (UPS).

José Renes Pinheiro, recebeu o grau de Bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria, e de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, respectivamente em 1981, 1984 e 1994. Foi Chair do Programa Técnico e Chair Geral do Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência de 1999 e 2013 e do Seminário de Eletrônica e Controle de Potência de 2000, 2005 e 2017. De 2001 a 2002, trabalhou no Center for Power Electronics Systems, Virginia Polytechnic Institute and State University (Virginia Tech), Blacksburg, como Pesquisador de Pós-Doutorado. Ele é autor de mais de 300 artigos técnicos publicados em conferências e revistas. Seus interesses atuais de pesquisa incluem conversão de alta frequência e alta potência, fontes de alimentação, conversores multiníveis, modelagem e controle de conversores e projeto otimizado de conversores.