

# PARALELISMO DE INVERSORES COM COMPARTILHAMENTO INSTANTÂNEO DE POTÊNCIA E TAXA DE COMUNICAÇÃO REDUZIDA

ADEMIR TOEBE, CASSIANO RECH

*Grupo de Eletrônica de Potência e Controle, Universidade Federal de Santa Maria  
Avenida Roraima, 1000, Centro de Tecnologia – Anexo A, GEPOC.  
ademir.eng.eletrica@gmail.com, rech.cassiano@gmail.com*

**Abstract:** This paper presents a control structure for inverter parallelism in applications with low load connection impedances, such as rack mounted UPSs. Initially, the models used to control the inverters and the impacts of the measurement errors of the output voltage on power sharing are analyzed. The use of virtual impedances is then analyzed, demonstrating the limitations due to the distortions that they cause in the output voltage. Thus, a control structure that uses virtual impedances in the circulation currents, besides a system that minimizes measurement errors through shared information with reduced communication rate is proposed. Simulation and experimental results demonstrate the effectiveness of the method, allowing the reduction of the communication rate by up to ten times, compared to the instantaneous sharing methods, however, without losing the advantageous characteristics of these methods. In addition, the system is able to operate even with measurement errors greater than 2%.

**Keywords:** inverter parallelism, power sharing, measurement errors.

**Resumo:** Este artigo apresenta uma estrutura de controle para paralelismo de inversores em aplicações com baixas impedâncias de conexão à carga, tais como UPSs montadas em racks. Inicialmente são analisados os modelos empregados no controle dos inversores e o impacto que os erros de medida da tensão de saída têm sobre o compartilhamento de potência. O emprego de impedâncias virtuais é então analisado, demonstrando suas limitações devido as distorções que as mesmas provocam na tensão de saída. Dessa forma, propõe-se uma estrutura de controle que utiliza impedâncias virtuais nas correntes de circulação, além de um sistema que minimiza os erros de medida através de informações compartilhadas com taxa de comunicação reduzida. Resultados de simulação e experimentais demonstram a efetividade do método, permitindo a redução da taxa de comunicação em até dez vezes, se comparado aos métodos de compartilhamento instantâneo, contudo, sem perder as características vantajosas desses métodos. Além disso, o sistema demonstrou-se capaz de operar mesmo com erros de medida maiores que 2%.

**Palavras-chave:** paralelismo de inversores, compartilhamento de potência, erros de medida.

## 1. Introdução

Nas últimas décadas, o aperfeiçoamento dos dispositivos semicondutores, das topologias de conversores estáticos e de suas técnicas de controle, permitiu o aumento da eficiência e densidade de potência desses conversores. Contudo, em diversas aplicações, tal como fontes ininterruptas de energia (UPS – *Uninterruptible Power Supply*), acionamentos elétricos e geração distribuída, os níveis de potência muitas vezes são demasiadamente elevados para serem processados com os dispositivos semicondutores existentes. Nestas situações, sistemas modulares com paralelismo de conversores podem ser utilizados, possibilitando ainda o aumento da confiabilidade do sistema através de módulos de potência redundantes (Sato *et al.*, 2010), (Guerrero, Hang and Uceda, 2008). Nesse contexto, o paralelismo de conversores CC-CA (inversores) é um desafio complexo principalmente no que tange o compartilhamento das potências ativa e reativa (Tolani and Sensarma, 2016). Quando ocorre desequilíbrio nas potências processadas pelos conversores, surgem correntes de circulação entre os mesmos, podendo gerar instabilidade, redução da eficiência e até danos irreparáveis nos dispositivos. O compartilhamento de potência seria ideal caso a

amplitude e fase das tensões de saída sintetizadas fossem exatamente iguais. Contudo, na prática diversos fatores causam diferenças nas tensões, tais como: variações paramétricas dos componentes de potência, dinâmicas não modeladas, erros numéricos, erros de medidas, atrasos de propagação, etc.

O método mais simples para melhorar o compartilhamento de potência da carga é a utilização de indutores de acoplamento para conectar os inversores à carga (Chen, Chu and Huang, 1992). Contudo, esses elementos passivos são volumosos e provocam grandes distorções nas tensões, principalmente quando alimentam cargas não lineares. Dessa forma, técnicas de controle avançadas foram introduzidas para garantir o compartilhamento de potência. Normalmente, essas técnicas são classificadas de acordo com a existência ou não de comunicação entre os módulos (Guerrero, Hang and Uceda, 2008). O paralelismo sem comunicação emprega conceitos clássicos utilizados no controle do fluxo de potência em sistemas elétricos. Esses métodos são chamados de *droop*, emulando-se o comportamento das máquinas síncronas para controlar as potências ativa e reativa fornecidas pelo inversor (Chandorkar *et al.*, 1995), (Guerrero *et al.*, 2011). Dentre as vantagens destes métodos pode-se destacar a complexidade reduzida, além de maior confiabilidade e segurança, uma vez que o controle é realizado apenas com informações locais de potência

ativa e reativa. A partir dos cálculos das potências, os controladores modificam a amplitude e/ou fase da própria referência de tensão, ajustando-se assim o fluxo de potência dos módulos de potência. Embora seja um sistema com controle de tensão completamente descentralizado, na prática ocorrem flutuações na frequência e amplitude da tensão em função da carga. Consequentemente, em muitos casos emprega-se uma comunicação de dados não crítica para restauração desses parâmetros (Guerrero, Lijun Hang and Uceda, 2008).

Sistemas que empregam comunicação em tempo real na estrutura de controle normalmente são tratados como sistemas mais complexos e de modularidade reduzida (Sun *et al.*, 2003), (Guerrero, Hang and Uceda, 2008). Contudo, apresentam dinâmicas e precisão de compartilhamento superior, sendo normalmente descritos como sistemas com compartilhamento instantâneo da corrente (ICS – *Instantaneous Current Sharing*). Dentre estes sistemas pode-se destacar: (i) controle centralizado (CC – *Centralized Control*) (Guerrero, Hang and Uceda, 2008), (ii) mestre-escravo (MS – *Master Slave*) (Chen and Chu, 1995), (iii) compartilhamento em cascata (3C – *Circular Control Chain*) (Chiang, Lin and Yen, 2003) e (iv) compartilhamento médio de potência (ALS – *Averaged Load Sharing*) (Sun *et al.*, 2003). Os sistemas CC, MS e 3C possuem controle de tensão centralizado, exigindo uma unidade de controle específica no caso do CC ou que um dos módulos seja definido para tal na estrutura MS ou 3C. A unidade que executa a malha de tensão deve enviar a referência de corrente para as demais unidades na taxa de amostragem da malha de tensão, requerendo uma alta taxa de comunicação. Por outro lado, embora a estrutura ALS possua um controle de tensão distribuído, a mesma requer um barramento de sincronismo da referência de tensão e um barramento para troca de informação das correntes de todos os módulos (Wu *et al.*, 2006). Consequentemente, a estrutura ALS é pouco modular, além de demandar uma elevada taxa de comunicação.

Dentre os métodos que efetuam o controle descentralizado da tensão de saída, o *droop* tem a vantagem de não utilizar comunicação e o ALS de proporcionar o compartilhamento instantâneo. Ambos os métodos efetuam ajustes nas suas referências de tensão, sendo que o *droop* é baseado nas curvas de potência e o ALS na corrente média do sistema. Entretanto, essas técnicas são altamente suscetíveis à instabilidade já que se têm  $N$  módulos tentando controlar uma única variável, ou seja, a tensão CA de saída. A impedância virtual é um mecanismo amplamente empregado com o método *droop* e em (Zhang *et al.*, 2013) também foi empregada no método ALS, reduzindo-se assim o efeito das variações paramétricas que influenciam na impedância dos inversores e do barramento de potência. Contudo, variações paramétricas dos sensores e demais componentes da instrumentação são apontados como críticos no compartilhamento adequado de potência. Em (Zhong, 2013) foi

apresentado um sistema que calcula o valor eficaz da tensão para melhorar a precisão do *droop*. Contudo, o erro de medida é apontado como fator limitante, sendo inclusive apresentada a relação entre o erro percentual da medida e o consequente impacto no compartilhamento. Para mitigar tal efeito, o autor sugere um barramento de medição exclusivo, porém, isso ainda não elimina os erros nos demais componentes da instrumentação. Simulações apresentadas em (Lazzarin, 2010) demonstraram que 1% de erro no ganho do sensor de tensão possui efeito muito mais significativo que 10% de erro nos componentes do filtro.

Embora alguns autores apontem a criticidade das variações nos componentes da instrumentação, poucas análises e soluções práticas foram apresentadas. Dessa forma, este trabalho visa demonstrar o impacto dessas variações na estrutura de controle. Posteriormente, é proposta uma estrutura de controle que minimiza os efeitos dos erros de medida, através de uma estrutura de controle e comunicação, mas exigindo uma taxa de comunicação menor que os sistemas ICS.

## 2. Modelagem e Análise do Sistema

O sistema sob estudo é formado por inversores monofásicos alimentados em tensão (VSI – *Voltage Source Inverters*) conectados em paralelo. A Figura 1 apresenta o circuito equivalente para dois inversores. O fluxo de potência ativa e reativa entre os inversores depende da amplitude e fase das tensões  $E_1$  e  $E_2$ , das impedâncias de saída dos inversores ( $Z_{o1}$  e  $Z_{o2}$ ), das impedâncias de conexão ( $Z_{L1}$  e  $Z_{L2}$ ), além da impedância da carga  $Z_L$ . Conforme pode ser observado, são inúmeras as variáveis que interferem no compartilhamento de potência entre os inversores. Embora as impedâncias de linha possam ser significativas em redes de geração distribuída, este artigo aborda sistemas UPS em que os inversores estejam localizados com proximidade, tal como em um *rack*, por exemplo. Nessas estruturas, as impedâncias de conexão são extremamente baixas e com característica resistiva. Dessa forma, pequenas variações nas tensões de saída dos inversores podem provocar correntes de circulação elevadas. Inicialmente, os modelos e estrutura de controle são analisados para um módulo operando isoladamente e posteriormente para dois módulos.

### A. Análise de um módulo isolado

Para a análise e obtenção dos resultados, será considerada a topologia de inversor três níveis tipo T (3LT<sup>2</sup>C – *Three Level T-type Converter*) com filtro LC, como mostrada na Figura 2. Contudo, a análise apresentada é válida para qualquer topologia de VSI com filtro LC de saída. O diagrama de blocos que representa o modelo médio dinâmico do inversor é apresentado na Figura 3.

Embora existam diversas estruturas de controle disponíveis na literatura, estruturas com múltiplas malhas, como apresentada na Figura 4, são muito empregadas, nas quais uma malha externa efetua o controle da tensão de saída e uma malha interna controla a corrente do indutor de filtro, garantindo também proteção em caso de sobrecarga. Nessa figura,  $G_{id}(s)$  é a função de transferência que relaciona a corrente no indutor com a razão cíclica e  $G_{vi}(s)$  é a função de transferência que relaciona a tensão de saída com a corrente no indutor, dadas respectivamente por:

$$G_{id}(s) = \frac{i_L(s)}{d(s)} = \frac{V_{in}}{sL} \quad (1)$$

$$G_{vi}(s) = \frac{v_o(s)}{i_L(s)} = \frac{1}{sC} \quad (2)$$

onde  $V_{in} = V_{dc}/2$  para o inversor tipo T. Ainda,  $C_i(s)$  e  $C_v(s)$  são os compensadores das malhas de corrente e tensão, respectivamente, e  $H_i(s)$  e  $H_v(s)$  são os ganhos dos sensores de corrente e tensão, respectivamente.

Para análise do impacto dos erros de medidas na tensão de saída, foi considerada a entrada  $p(s)$ , que representa uma perturbação no sinal medido. Ao analisar o diagrama de blocos apresentado na Figura 4, obtém-se:

$$v_o(s) = A(s)[v_{ref}(s) - p(s)] \quad (3)$$

onde:

$$A(s) = \frac{C_v(s)MF_i(s)G_{vi}(s)}{1 + H_v(s)C_v(s)MF_i(s)G_{vi}(s)} \quad (4)$$

sendo  $MF_i(s)$  a função de transferência em malha fechada da malha de corrente. Pode-se observar que, a perturbação na medida resulta em uma perturbação na própria referência, não sendo possível eliminar seu efeito na saída do sistema. Para um sistema operando de forma isolada o principal efeito será um erro na tensão de saída, conforme a natureza da perturbação.

### B. Análise de módulos em paralelo

Inicialmente, a partir do circuito equivalente da

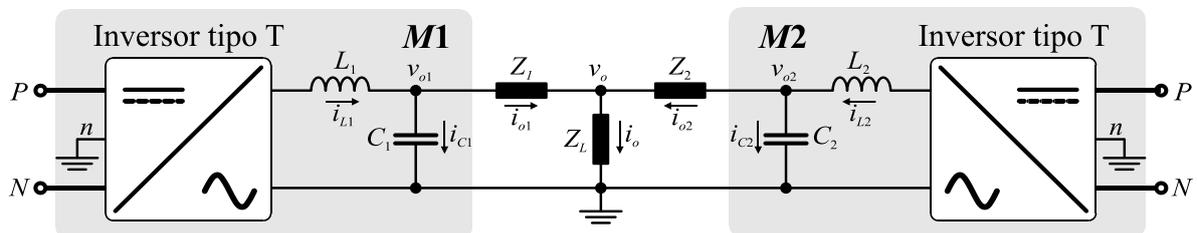


Figura 5. Sistema com dois inversores em paralelo.

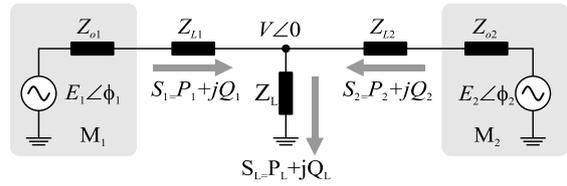


Figura 1. Circuito equivalente de dois inversores conectados em paralelo.

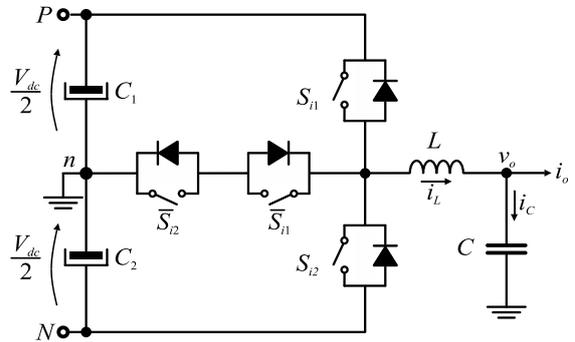


Figura 2. Inversor de três níveis tipo T.

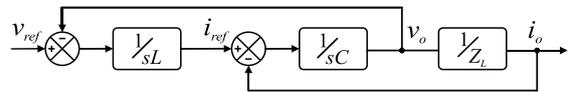


Figura 3. Modelo do inversor.

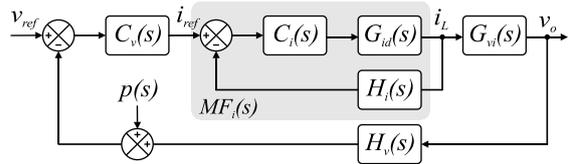


Figura 4. Estrutura de controle para análise.

Figura 5, é obtido o modelo que relaciona a tensão de saída  $v_o$  em função das tensões dos dois módulos  $v_{o1}$  e  $v_{o2}$  e das impedâncias de linha  $Z_1$  e  $Z_2$ , além da impedância da carga. Considerando-se que, idealmente,  $v_{o1}$  e  $v_{o2}$  são fontes de tensão com impedância de saída nula, as impedâncias  $Z_{o1}$  e  $Z_{o2}$  são desprezadas na análise. Dessa forma, a análise do circuito fornece a tensão  $v_o$  de acordo com:

$$v_o = v_{o1} - i_{o1}Z_1 \quad (5)$$

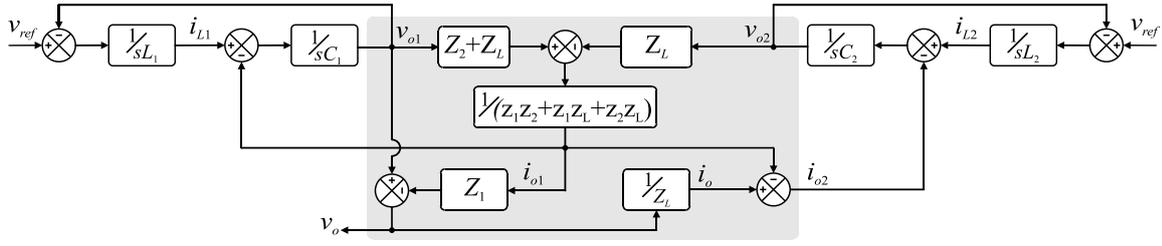


Figura 6. Modelo do sistema com dois inversores em paralelo.

que depende da impedância de linha  $Z_1$  e da corrente  $i_{o1}$ , que pode ser obtida por:

$$i_{o1} = \frac{v_{o1}(Z_2 + Z_L) - v_{o2}Z_L}{Z_1Z_2 + Z_1Z_L + Z_2Z_L}. \quad (6)$$

Ainda, para analisar o compartilhamento da corrente em função da diferença de tensão produzida por ambos os módulos, deve-se obter  $i_{o2}$ , dada por:

$$i_{o2} = \frac{v_o}{Z_L} - i_{o1}. \quad (7)$$

Dessa forma pode-se representar o sistema com dois inversores em paralelo através do modelo apresentado na Figura 6, o qual demonstra a inter-relação entre as impedâncias de saída e da carga.

Uma vez que está sendo considerando um sistema com impedâncias de linha baixas, típico de aplicações como UPSs montadas em um mesmo *rack*, assume-se aqui que estas sejam apenas resistivas e de valor reduzido. Como exemplo, considera-se que a impedância do primeiro módulo é o dobro da impedância do segundo módulo. Essa diferença pode ocorrer devido a oxidações nos conectores, comprimento diferente dos cabos de conexão devido à disposição dos módulos no *rack*, além de outras disparidades resultantes dos processos de fabricação e montagem. Os dados gerais do sistema simulado são apresentados na Tabela 1. Como deseja-se avaliar o comportamento da tensão de saída e das correntes de circulação em função de uma diferença nas tensões  $v_{o1}$  e  $v_{o2}$ , foi aplicado um degrau de 1% na referência do módulo 1. Para esta análise foi empregada uma referência CC, o que é usualmente realizado na validação de modelos de conversores estáticos, uma vez que torna mais visível os efeitos da perturbação em um ponto de operação do sistema. A Figura 7 comprova a validação do modelo, onde se verifica que 1% de diferença nas tensões já é capaz de provocar um desequilíbrio de corrente acima de 30 A em um intervalo de 20 ms. Esse desequilíbrio tende a estabilizar em determinado ponto, e depende tanto da diferença entre as tensões sintetizadas quanto das impedâncias  $Z_1$  e  $Z_2$ .

Considerando que, pelos motivos previamente citados, as tensões produzidas pelos módulos serão diferentes e as impedâncias  $Z_1$  e  $Z_2$  são variáveis

muitas vezes desconhecidas, uma alternativa para minimizar essas diferenças é a inclusão de impedâncias virtuais de acordo com o modelo da Figura 8. Essas impedâncias virtuais apresentam efeito equivalente às resistências presentes nos indutores dos filtros, reduzindo o ganho dos conversores com o crescimento da corrente, forçando assim um equilíbrio de potência.

Tabela 1. Parâmetros do sistema simulado

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tensão RMS de saída	$V_{out}$	127 V / 60 Hz
Tensão de Barramento	$V_{dc}$	450 V
Potência por módulos	$P_{out}$	2 kVA
Frequência de comutação	$f_s$	20k kHz
Indutor de Filtro	$L$	450 $\mu$ H
Capacitor de Filtro	$C$	18 $\mu$ F
Resistor de Amortecimento	$R_f$	50 m $\Omega$
Número de módulos	$N$	2
Ganho do sensor de $M_1$	$H_{f1}$	1
Ganho do sensor de $M_2$	$H_{f2}$	1.02
Impedância de Linha de $M_1$	$Z_1$	20 m $\Omega$
Impedância de Linha de $M_2$	$Z_2$	10 m $\Omega$
Impedância da carga	$Z_L$	5 $\Omega$

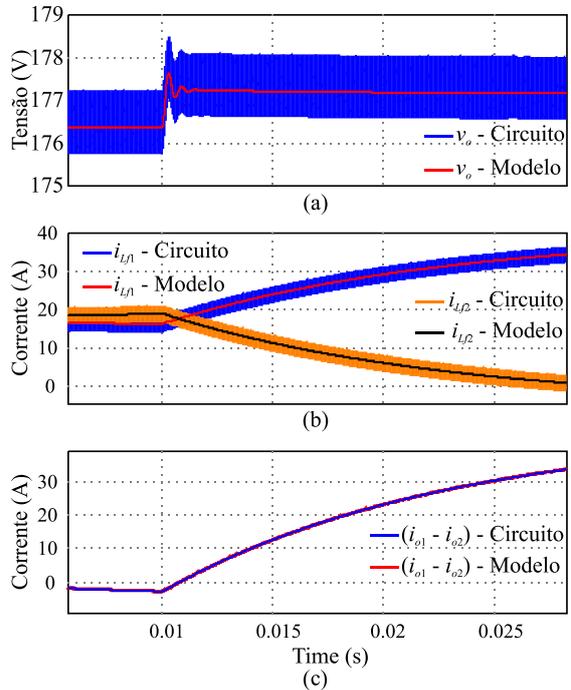


Figura 7. Validação do modelo com descaimento de 1% nas tensões.  $v_{o1}$  e  $v_{o2}$ : (a) tensão de saída, (b) correntes nos indutores e (c), desequilíbrio entre as correntes nas saídas.

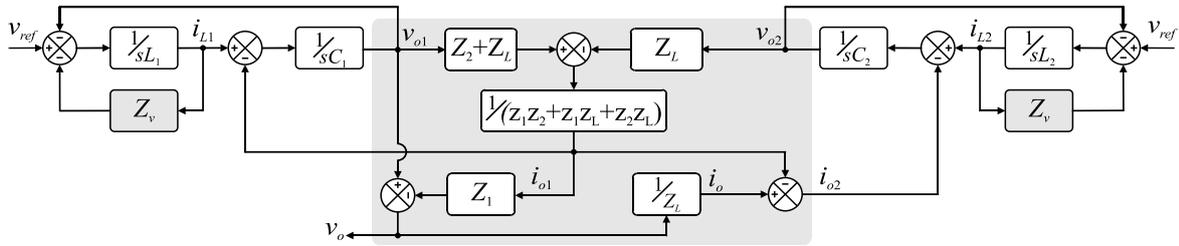


Figura 8. Modelo do sistema com dois inversores em paralelo com impedância virtual emulada nos indutores de filtro.

Empregando os valores utilizados no caso anterior, analisa-se agora o efeito da impedância virtual  $Z_v$  acrescida no circuito em malha aberta, cujos resultados são apresentados na Figura 9. Conforme pode ser visto, a inclusão de  $Z_v = 0,1 \Omega$  provoca uma pequena queda de tensão com drástica redução da diferença entre as correntes. Contudo, aumentando-se  $Z_v$  para  $0,5 \Omega$  e posteriormente para  $1 \Omega$ , percebe-se um impacto cada vez menor na diferença entre as correntes e uma queda de tensão cada vez mais acentuada. Logo, conclui-se que há limites práticos para a adição de  $Z_v$ .

Para analisar o sistema em malha fechada foram utilizados compensadores projetados por métodos convencionais no domínio da frequência em função das margens de fase e margens de ganho adequadas. Para a malha interna foi empregado um compensador proporcional e para a malha de tensão um compensador ressonante. Partindo-se o sistema com meia carga e impedância virtual nula, têm-se os resultados da Figura 10. É possível observar que, embora a tensão de saída se mantenha praticamente inalterada na Figura 10.a, as correntes dos módulos divergem rapidamente, de acordo com a Figura 10.b. No instante próximo à 160 ms um degrau de carga é aplicado, demonstrando que o aumento da carga acaba tendo um efeito positivo no compartilhamento de potência. Na Figura 11 são apresentados os resultados de simulação similar a da Figura 10, contudo, empregando-se uma impedância virtual de  $0,5 \Omega$ , resultando em uma redução drástica da corrente de circulação. Contudo, é possível ver uma

queda de tensão acentuada, demonstrando a limitação que a impedância virtual impõe ao sistema.

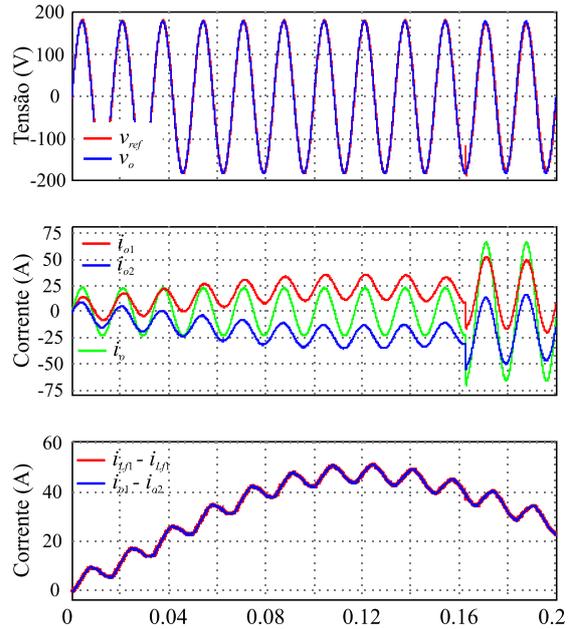


Figura 10. Correntes e tensões com impedância virtual nula.

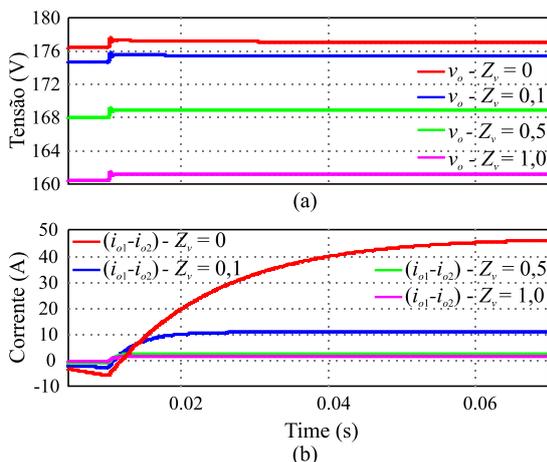


Figura 9. Efeito da impedância virtual: (a) queda de tensão na saída, (b) diferença entre as correntes.

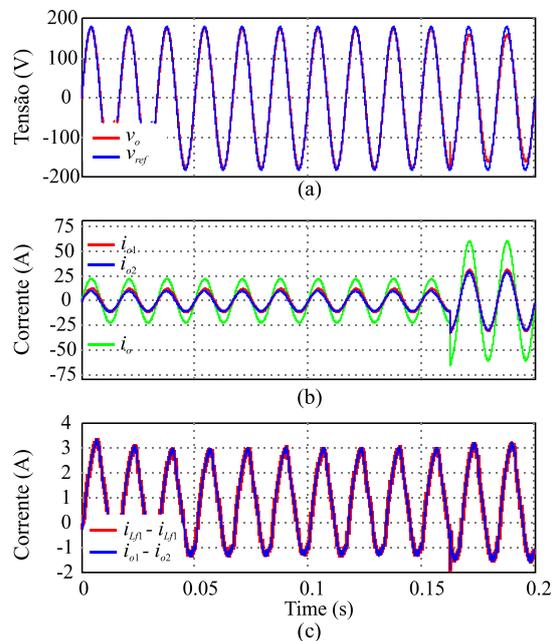


Figura 11. Correntes e tensões com impedância virtual de  $0,5 \Omega$ .

### 3. Estrutura de Controle Proposta

Conforme analisado, a impedância virtual pode ser um mecanismo eficiente para melhorar o compartilhamento da corrente, contudo, possui limitações devido ao impacto na regulação de tensão. Dessa forma, propõe-se um sistema que utilize impedâncias virtuais além de um sistema que permita minimizar o erro de medida de tensão com relação a um dos módulos de referência, que assumirá o papel de mestre. Para isto serão transmitidas apenas duas informações do módulo mestre aos escravos: (i) a corrente do indutor  $i_{L1}$  e (ii), a tensão medida no capacitor  $v_{o1}$ . Essas transmissões, não são efetuadas a cada período de amostragem da malha de tensão, permitindo assim uma redução na taxa de comunicação. A Figura 12 apresenta a estrutura de controle proposta.

#### A. Impedância virtual na corrente de circulação

A queda de tensão inserida na referência dos escravos e do mestre é o efeito direto da impedância virtual com o propósito de obter o compartilhamento de potência. No módulo mestre a impedância virtual  $Z_v$  será inserida apenas na corrente local. Nos módulos escravos a impedância virtual será composta de uma parcela  $Z_v$  exatamente igual à do mestre e uma parcela  $Z_{circ}$  que terá efeito nas correntes de circulação. Dessa forma a queda na referência de tensão dos escravos será mais acentuada quando ocorrer uma diferença na sua corrente em relação à do mestre, de acordo com:

$$v_{queda} = i_{Ln} Z_v + (i_{Ln} - i_{L1}) Z_{circ}. \quad (8)$$

Conseqüentemente, a estrutura proposta permite reduzir de forma acentuada a impedância  $Z_v$ , transferindo a principal parcela da impedância virtual para  $Z_{circ}$ . Esse método é semelhante ao proposto com o sistema ALS em (Zhang *et al.*, 2013). Entretanto, naquele método se emprega a diferença entre a corrente local e a média das correntes. Por outro lado, no método proposto tem-se a vantagem de se transmitir apenas uma informação de corrente, reduzindo-se significativamente o fluxo de informações transmitidas.

#### B. Correção das medidas

Considerando que erros de medida na tensão de saída provocam grande diferença no compartilhamento da carga, uma alternativa é comparar a medida de tensão dos escravos com a medida de referência do mestre. Dessa forma, é possível detectar possíveis perturbações e eliminá-las da medida local. No método proposto, coeficientes de erro são calculados cada vez que os escravos recebem uma transmissão do mestre. Nos demais instantes os

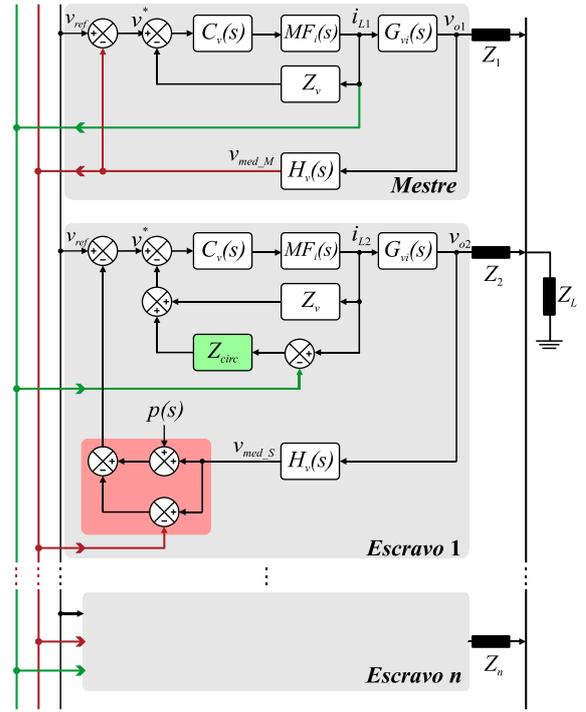


Figura 12. Sistema de paralelismo proposto.

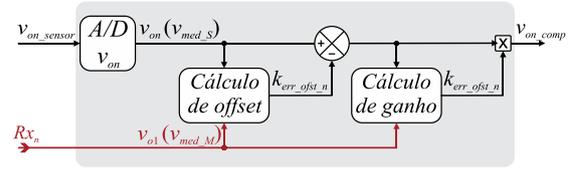


Figura 13 estratégia de correção das medidas

escravos utilizam esses coeficientes para ajustar suas medidas, conforme ilustrado na Figura 13. Um possível erro de *offset* residual na medida  $k_{err\_ofst}$  foi calculado através de:

$$k_{err\_ofst} = (V_{mestre} - V_{local}) LPF_{ofst} \quad (9)$$

onde  $LPF_{ofst}$  é um filtro passa baixas (LPF – Low Pass Filter) que pode ser implementado de forma digital, cuja banda depende das frequências de amostragem e taxa de comunicação. O coeficiente de correção de ganho é então calculado por:

$$k_{err\_ganho\_n} = \left( \frac{V_{mestre}}{V_{local} - k_{err\_ofst}} \right) LPF_{ganho} \quad (10)$$

onde  $LPF_{ganho}$  é um filtro passa baixas na mesma banda do filtro  $LPF_{ofst}$ . Finalmente a medida local é corrigida através de:

$$v_{on\_comp} = v_{on} k_{err\_ganho\_n}. \quad (11)$$

### C. Simulação do sistema

O sistema de controle proposto foi simulado nas mesmas condições nas quais foram obtidos os resultados da Figura 11. Contudo, a impedância  $Z$ , foi reduzida dez vezes, ou seja,  $50 \text{ m}\Omega$ , enquanto que para a impedância de circulação foi empregado um valor de  $1 \Omega$ .

Além disso, foi simulada uma frequência de transmissão das medidas de um décimo da frequência de amostragem da malha de tensão. O erro de ganho do sensor do módulo 2 foi de 2% com um offset de 5 V. A Figura 14 apresenta os resultados de simulação do sistema proposto. É possível ver na Figura 14(c) que a corrente de circulação vai reduzindo à medida que o coeficiente de erro tende ao valor de 2%, apresentado no gráfico como valor percentual e não real. Além disso, a queda na tensão foi muito menor, uma vez que, a impedância virtual é muito baixa em condições de equilíbrio das correntes, apenas tendo efeito significativo sobre as correntes de circulação. Embora a estrutura de controle dos módulos escravos seja diferente da estrutura do módulo mestre, não há restrições de hardware que impeça a troca de funções entre os módulos em caso de falha. Entretanto, o sistema de comunicação deve permitir a comunicação de todos os módulos no mesmo barramento pra não limitar a modularidade. Em caso de falhas, o módulo que possui índice logo acima ao mestre anterior passa a ser o mestre e transmite suas medidas como referência. Na prática, os três barramentos da Figura 12 foram convertidos em apenas um barramento de comunicação UART padrão RS-485, no qual o mestre apenas transmite e os escravos apenas recebem. A comunicação foi implementada com taxa de 4,68 Mbps, onde três bytes foram formatados para transmitir duas variáveis de 11 bits. Além disso, dois bytes adicionais foram utilizados para transmitir informações de operação e gerenciamento e, checagem de redundância cíclica (CRC – *Cyclic Redundancy Check*), respectivamente.

## 4. Resultados Experimentais

Resultados experimentais foram obtidos com dois módulos em paralelo, alimentando uma carga linear de 2 kVA. O valor da impedância virtual empregado foi de  $0,3 \Omega$  em ambos os módulos e de  $3 \Omega$  na impedância virtual da corrente de circulação, no módulo 2. A transmissão das informações foi realizada a cada 4 períodos de amostragem da malha de tensão, a qual foi amostrada na mesma frequência do modulador PWM. Na Figura 15 são apresentadas as formas de onda das correntes nos indutores e na carga, bem como da tensão de saída quando realizado um degrau de carga de 1 kVA para 2 kVA. Foi também realizado um ensaio de degrau de carga, de à vazio para carga de 2 kVA, cujos resultados são apresentados na Figura 16. Conforme pode ser visto, em ambos os ensaios de degrau de carga o sistema permaneceu estável com boa dinâmica no

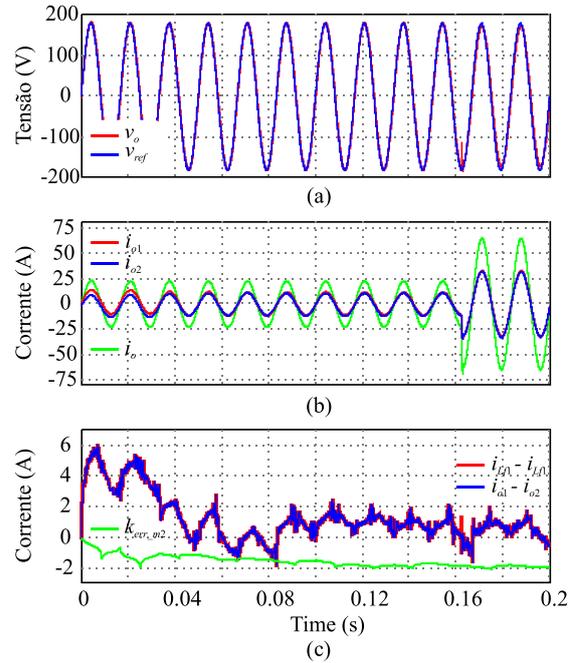


Figura 14. Sistema de paralelismo proposto

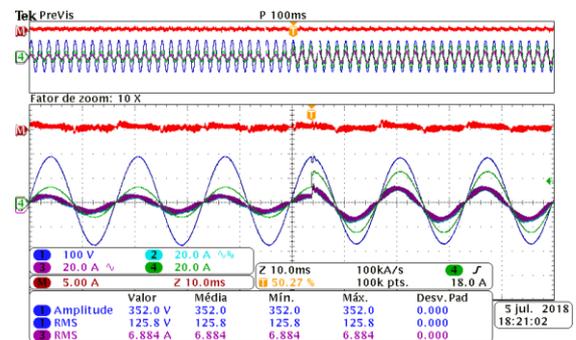


Figura 15. Degrau de carga de 1 kVA para 2 kVA. Canal 1:  $v_o$ ; Canal 2:  $i_{L1}$ ; Canal 3:  $i_{L2}$ ; Canal 4:  $i_o$ ; Canal M:  $i_{L1} - i_{L2}$

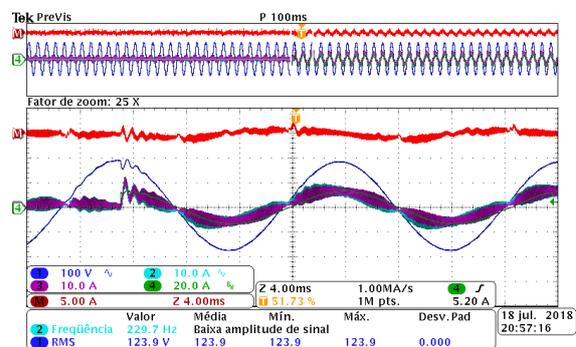


Figura 16. Degrau de carga de 0 para 2 kVA. Canal 1:  $v_o$ ; Canal 2:  $i_{L1}$ ; Canal 3:  $i_{L2}$ ; Canal 4:  $i_o$ ; Canal M:  $i_{L1} - i_{L2}$ .

compartilhamento da corrente de carga. A Figura 17 apresenta o efeito da correção da medida de tensão na redução da corrente de circulação. Inicialmente o sistema estava operando sem a correção, sendo inserido propositalmente um erro de ganho de 2% na medida de tensão do módulo escravo. Instantes seguintes, o sistema de correção foi ativado, de modo

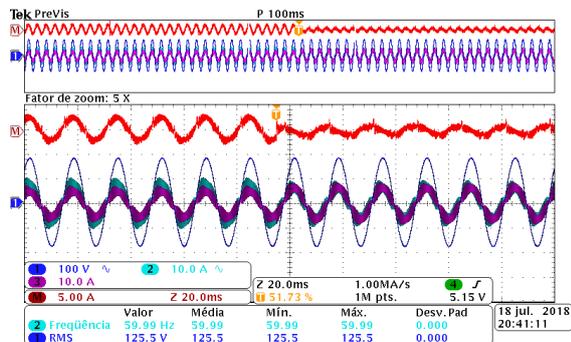


Figura 17. Efeito da correção da medida de tensão sobre a corrente de circulação. Canal 1:  $v_c$ ; Canal 2:  $i_{L1}$ ; Canal 3:  $i_{L2}$ ; Canal M:  $i_{L1}-i_{L2}$ .

que, as correntes dos indutores entraram em fase, com amplitudes idênticas e consequente redução na corrente de circulação.

## 5. Conclusão

O sistema proposto permitiu a implementação de uma estrutura de controle de tensão e corrente distribuído, aliando a boa dinâmica dos sistemas com compartilhamento instantâneo, contudo, com redução expressiva na taxa de comunicação. A correção das medidas aliada a impedância virtual nas correntes de circulação tornou possível a redução da impedância virtual convencional, melhorando significativamente a regulação da tensão de saída. Além disso, a utilização da correção de medida do módulo escravo com relação ao módulo mestre permitiu uma significativa redução da corrente de circulação.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Schneider Electric pelo apoio financeiro.

## Referências Bibliográficas

- Chandorkar, M. C. *et al.* (1995) ‘Novel architecture and control for distributed UPS systems’, pp. 632–635.
- Chen, J. and Chu, C. (1995) ‘Combination Voltage-Controlled and Current-Controlled PWM Inverters for UPS Parallel Operation’, 10(5).
- Chen, J., Chu, C. and Huang, C. (1992) ‘The parallel operation of two UPS by the coupled-inductor method’, *Proc. 1992 IEEE Int. Symp. Industrial Electronics*, (2), pp. 733–736. doi: 10.1109/ISIE.1992.279701.

- Chiang, S. J., Lin, C. H. and Yen, C. Y. (2003) ‘Current limitation control for multi-module parallel operation of UPS inverters’, *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 150(2), pp. 139–145. doi: 10.1049/ip-epa.
- Guerrero, J. M. *et al.* (2011) ‘Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids 2014 - a General Approach Toward Standardization’, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), pp. 158–172. doi: 10.1109/TIE.2010.2066534.
- Guerrero, J. M., Hang, L. and Uceda, J. (2008) ‘Control of Distributed Uninterruptible Power Supply Systems’, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(8), pp. 2845–2859. doi: 10.1109/TIE.2008.924173.
- Guerrero, J. M., Hang, L. and Uceda, J. (2008) ‘Control of Distributed Uninterruptible Power Supply Systems’, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(8), pp. 2845–2859. doi: 10.1109/TIE.2008.924173.
- Lazzarin, T. B. (2010) *PARALELISMO DE INVERSORES DE TENSÃO*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Sato, E. K. *et al.* (2010) ‘Redundant High-Density High-Efficiency Double-Conversion Uninterruptible Power System’, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(4), pp. 1525–1533.
- Sun, X. *et al.* (2003) ‘Modeling , Analysis , and Implementation of Parallel Multi-Inverter Systems With Instantaneous’, 18(3), pp. 844–856.
- Tolani, S. and Sensarma, P. (2016) ‘Extended bandwidth instantaneous current sharing scheme for parallel UPS systems’, *IEEE Transactions on Power Electronics*, PP(99), pp. 4960–4969. doi: 10.1109/TPEL.2016.2604251.
- Wu, T.-F. *et al.* (2006) ‘A Voltage-Error-Sharing Scheme for Parallel-Inverter Systems to Improve Weighting Current Distribution and Dynamic Response’, *Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06.*, pp. 1723–1729. doi: 10.1109/APEC.2006.1620773.
- Zhang, Y. *et al.* (2013) ‘Instantaneous current-sharing control strategy for parallel operation of UPS modules using virtual impedance’, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(1), pp. 432–440. doi: 10.1109/TPEL.2012.2200108.
- Zhong, Q. C. (2013) ‘Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel’, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(4), pp. 1281–1290. doi: 10.1109/TIE.2011.2146221.