

# ANÁLISE DO PARALELISMO DE UPS SEM COMUNICAÇÃO - ESTUDO DE CASO PARA CARGAS LINEARES E NÃO LINEAR

ERCÍLIO I. MOREIRA\*, LEONARDO A. R. DA SILVA†, EDGAR C. FURTADO†

*\*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901  
Belo Horizonte, MG, Brasil*

*†Departamento das Engenharias de Telecomunicações e Mecatrônica  
Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba  
Rod.: MG 443, KM 7, Ouro Branco, MG, Brasil*

Emails: [ercilioinacionomoreira@gmail.com](mailto:ercilioinacionomoreira@gmail.com), [leonardo@ufsj.edu.br](mailto:leonardo@ufsj.edu.br), [edgar@ufsj.edu.br](mailto:edgar@ufsj.edu.br)

**Abstract**— Methods of synchronism control of multiple UPS, without interconnection between each other, presents high level of complexity in their digital implementation or any analytical stability study. This work proposes a new reference signal based on droop curves and the estimation of powers, active and reactive, aiming to reduce a complexity of the controll. There is no need for the explicit calculation of reactive power and there are no singularities and/or discontinuities in the signals involved. Computational simulations are performed with two UPSs operating in parallel, connected with linear and non-linear loads. The results indicate that the technique is satisfactory in solving the problem of adequate power sharing.

**Keywords**— UPS; Paralelism; Droop Curves; linear and non-linear load.

**Resumo**— Métodos tradicionais de controle de sincronismo de múltiplas UPS, sem interconexão entre si, apresentam complexidade na implementação digital ou no estudo analítico de estabilidade. Este trabalho propõe um novo sinal de referência para o paralelismo baseado em curvas de decaimento e potências, ativa e reativa, visando diminuir a complexidade do controle. Não há a necessidade da estimação explícita da potência reativa e nem existem singularidades e/ou descontinuidades nos sinais envolvidos. Realizam-se simulações computacionais com duas UPS operando em paralelo, alimentando cargas resistiva, indutiva e não linear. Os resultados obtidos indicam que a técnica proposta é promissora na solução do problema de compartilhamento adequado de potência.

**Palavras-chave**— UPS; Paralelismo; Curvas de Decaimento; cargas lineares e não lineares.

## 1 Introdução

Nos dias atuais tem havido uma crescente demanda por fornecimento de energia ininterrupto e de qualidade. Haja vista, os avanços tecnológicos dos microprocessadores eletrônicos utilizados na fabricação de equipamentos para os mais diversos fins, tais como aparelhos de suporte à vida em hospitais, centrais telefônicas, instrumentos para controle de tráfego aéreo, entre outros. Nesses casos, por menor que seja a falta de energia, os possíveis danos, econômicos e/ou sociais, seriam incalculáveis.

O estudo da confiabilidade de fontes de energia ininterruptas (UPS) tem sido alvo de pesquisas nas últimas décadas (Sato e Kawamura, 2005; Rahmat et al., 2013; Xiaofei et al., 2015; Heine-mann e Jamil, 2016). Dentre as principais conclusões destaca-se a necessidade do aumento da redundância, com a conexão em paralelo de mais de uma fonte.

A redundância está relacionada com a demanda de energia da carga e com a capacidade de fornecimento das UPS. Um sistema com  $m + 1$  UPS em paralelo é redundante se, caso ocorra uma falha em alguma das  $m$  UPS, as restantes forem capazes de suprir a demanda da carga.

O paralelismo de UPS é, então, uma maneira

de operacionalizar essa redundância. Esse paralelismo pode ocorrer com ou sem compartilhamento de informação entre as unidades. Para o caso com comunicação, existem diversas técnicas consolidadas, dentre as quais citam-se: mestre-escravo (Chen e Chu, 1995), compartilhamento da corrente média (Sun et al., 2003), cadeia circular (Wu et al., 2000), e sinais de modo comum (Cheng e Sng, 2006).

Por outro lado, no paralelismo sem comunicação pode-se destacar as vantagens:

1. aumento de confiabilidade, pois elimina-se um possível ponto de falha;
2. aumento da modularidade do sistema;
3. elimina-se a necessidade de compatibilização da comunicação entre as unidades.

Entretanto, a despeito das vantagens apresentadas, o controle do paralelismo de multi-UPS sem comunicação não é uma tarefa trivial.

Neste trabalho é revisada a abordagem de controle baseada nas curvas de decaimento (Tuladhar et al., 1997), bem como na estimação de potência ativa e reativa, proposta por Furtado et al. (2008) e Furtado (2009). De fato, apresenta-se uma nova formulação para a lei de controle,

sendo comparada com outras duas formulações similares. Essa nova abordagem apresenta ganhos em relação às anteriores no que tange: conteúdo espectral (Furtado, 2009) e implementação digital, conforme apresentado ao longo do texto.

Este trabalho é organizado da seguinte forma: a Seção 2 revisa o controle de sincronismo de UPS por meio do método das curvas de decaimento; a Seção 3 apresenta a estrutura e modelo dos blocos inversor, estimador das potências e de controle, aplicados neste estudo; a Seção 4 traz os resultados numéricos obtidos; conclusões estão presentes na Seção 5.

## 2 Paralelismo de UPS sem comunicação

Na operação paralela sem interconexão entre UPS, assume-se que somente variáveis mensuráveis localmente estão disponíveis para utilização no controle. Frequentemente, utilizam-se tensão e corrente, medidas na saída de cada UPS. Partindo-se destas variáveis locais, um sinal de referência senoidal para tensão de saída é calculado com base no método das curvas de decaimento (Tuladhar et al., 1997), com o objetivo de garantir a distribuição da potência demandada pela carga entre as unidades UPS.

O método das curvas de decaimento estabelece relações entre as potências, ativa e reativa, estimadas a partir das variáveis medidas localmente, e a frequência e a amplitude do sinal de referência gerado, através das equações (Tuladhar et al., 1997):

$$\omega = \omega_{0r} - k_{\omega} p_a, \quad (1)$$

$$u_{rm} = u_{0r} - k_u p_r, \quad (2)$$

em que  $\omega$  e  $u_{rm}$  representam, respectivamente, a frequência e a amplitude calculadas para o sinal senoidal;  $\omega_{0r}$  e  $u_{0r}$  representam, respectivamente, a frequência e a amplitude nominais configuradas para o sistema;  $p_a$  e  $p_r$  são, respectivamente, as potências ativa e reativa, estimadas localmente através da tensão e corrente de saída;  $k_{\omega}$  e  $k_u$  são os coeficientes de decaimento. Esses coeficientes devem ser devidamente ajustados para uma operação estável.

Pode-se notar a partir das equações 1 e 2 que existe um desvio inevitável a partir das condições nominais, durante a operação com carga, uma vez que  $p_a \neq 0$  e/ou  $p_r \neq 0$ . Porém, esse desvio pode ser mantido dentro de limites aceitáveis através da correta escolha de  $k_{\omega}$  e  $k_u$ .

## 3 Estrutura da UPS

A figura 1(a) apresenta um esquemático de uma UPS monofásica, com seus principais elementos, que será utilizada nesse trabalho. Conforme mostrado, a estrutura da UPS considera um inversor

monofásico composto por uma fonte CC, seguida de um inversor PWM, fornecendo um sinal  $u_i$ , com base em um sinal de referência  $u_r$ .

Técnicas de controle para conversores CC-CA baseadas em PWM podem ser encontradas em Ye et al. (2006). O sinal de saída do inversor PWM é constituído de uma componente fundamental  $u_f$  somada a componentes harmônicas representadas por  $u_h$ . No entanto, o filtro composto pelo indutor  $l_f$  e pelo capacitor  $c_f$  fornece boa solução para eliminação dos harmônicos na tensão fornecida pela UPS, podendo-se considerar  $u_h \approx 0$ .

O indutor de acoplamento é necessário para garantir a operação estável, quando são aplicadas as equações 1 e 2 (Coelho et al., 2002). A resistência de acoplamento é representada por  $r_a$ . A impedância da linha é considerada desprezível diante da impedância inserida pelo indutor de acoplamento.

A figura 1(b) representa uma simplificação em relação à estrutura anterior, em que o conjunto formado pela fonte CC e inversor PWM é substituído por uma fonte de tensão controlada por tensão. Essa simplificação é considerada ao longo desse trabalho.

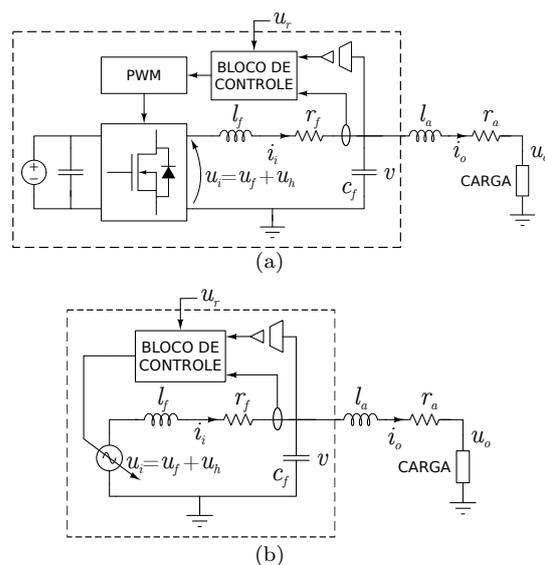


Figura 1: (a) Esquemático de uma UPS monofásica e elementos principais; (b) esquemático do modelo simplificado considerado no trabalho.

### 3.1 Cálculos das potências

O sinal de referência para controle do paralelismo é dependente do cálculo das potências ativa e reativa, conforme equações 1 e 2. Métodos usualmente utilizados para esse cálculo podem ser encontrados em Tuladhar et al. (1997) e Guerrero et al. (2002). Contudo, devido principalmente ao cálculo da potência reativa, esses métodos apresentam aumento de complexidade quando da análise de estabilidade do sincronismo entre as UPS

(Furtado et al., 2008).

Neste trabalho, a potência ativa é obtida por meio de um processo de filtragem passa-baixas, de primeira ordem, aplicado à potência instantânea, que é modelado por:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \omega_f [-x(t) + p_{\text{inst}}(t)], \\ p_{\text{ag}} \triangleq x(t), \end{cases} \quad (3)$$

em que  $\omega_f$  representa a frequência de corte e  $p_{\text{ag}}$  é definida como sendo a potência ativa generalizada. A potência instantânea, por sua vez, é dada por

$$p_{\text{inst}}(t) = u_o(t)i_o(t),$$

em que  $u_o(t)$  e  $i_o(t)$  representam, respectivamente, a tensão e a corrente mensuradas localmente.

A potência reativa é obtida por meio da teoria clássica de circuitos monofásicos por meio da equação (Elgerd, 1978) :

$$p_r(t, p_{\text{inst}}, p_a) = \frac{p_{\text{inst}}(t) - p_a[1 - \cos(2\omega t)]}{\sin(2\omega t)}, \quad (4)$$

em que  $\omega$  representa a frequência de operação do sistema.

### 3.2 Sinal de referência para paralelismo

As equações 3 e 4 podem ser utilizadas em conjunto com as equações 1 e 2 na formulação do sinal de referência para paralelismo das UPS. Substituindo-se  $p_{\text{ag}}$  (equação 3) na equação 1 e  $p_r$  (equação 4) na equação 2, obtém-se:

$$\omega = \omega_{0r} - k_{\omega} p_{\text{ag}}, \quad (5)$$

$$u_{\text{rm}} = u_{0r} - k_u \left\{ \frac{p_{\text{inst}}(t) - p_{\text{ag}}[1 - \cos(2\omega t)]}{\sin(2\omega t)} \right\}. \quad (6)$$

Vale ressaltar que a frequência  $\omega$  na equação 6 é calculada conforme mostrado na equação 5. O sinal de referência pode ser obtido a partir da equação 6 multiplicando-se ambos os lados da equação 6 por  $\sin(\omega t) = \frac{\sin(2\omega t)}{2 \cos(\omega t)}$ , ou seja,

$$\begin{aligned} u_{\text{rm}} \sin(\omega t) &= u_{0r} \sin(\omega t) + \frac{k_u p_{\text{ag}} [1 - \cos(2\omega t)]}{2 \cos(\omega t)} \\ &\quad - \frac{k_u p_{\text{inst}}(t)}{2 \cos(\omega t)}, \\ &= u_{0r} \sin(\omega t) \\ &\quad - k_u \left[ \frac{p_{\text{inst}}(t) - 2p_{\text{ag}} \sin^2(\omega t)}{2 \cos(\omega t)} \right], \\ &= \zeta(p_{\text{ag}}, p_{\text{inst}}, t). \end{aligned} \quad (7)$$

A equação 7 em conjunto com a equação 5 representa o sinal de referência para o paralelismo da UPS. No entanto, conforme relatado por Furtado et al. (2008), nessa formulação, tal sinal apresenta

singularidades nos pontos em que  $\cos(\omega t) = 0$ , impedindo a utilização do mesmo. Para contornar esse problema duas soluções foram propostas. A primeira solução (Furtado et al., 2008) consiste na substituição do termo  $\cos(\omega t)$ , próximo aos pontos de singularidade, por uma constante  $\epsilon$ , com  $0 < \epsilon \ll 1$  quando  $|\cos(\omega t)| \leq \epsilon$ . Nesse caso, a equação 7 pode ser reescrita como:

$$\zeta_{\epsilon}(p_{\text{ag}}, p_{\text{inst}}, t) = \begin{cases} \zeta(p_{\text{ag}}, p_{\text{inst}}, t), & \text{se } |\cos(\omega t)| > \epsilon; \\ u_{0r} \sin(\omega t) - k_u \left[ \frac{p_{\text{inst}}(t) - 2p_{\text{ag}} \sin^2(\omega t)}{2\epsilon} \right], & \text{se } |\cos(\omega t)| \leq \epsilon. \end{cases} \quad (8)$$

A solução proposta na equação 8 resulta em um sinal de referência modificado  $\zeta_{\epsilon}$ , que minimiza o efeito das singularidades. Entretanto, essa solução produz distorção harmônica na tensão sobre a carga, além de adicionar uma não linearidade ao sistema, o que pode tornar a análise de estabilidade do sincronismo mais complexa.

Uma segunda solução para as singularidades desse sinal foi proposta por Furtado (2009). Nesse trabalho, realizou-se uma aproximação, valendo-se da seguinte relação:

$$h_s(\omega, k) = \frac{k^2 \cos(\omega t)}{1 + k^2 \cos^2(\omega t)} \approx \sec(\omega t), \quad (9)$$

em que  $k$  é uma constante real, chamada de constante de suavização. A figura 2 apresenta uma comparação dessa aproximação para dois valores de  $k$ . De fato, essa solução modificou a equação 7, removendo singularidades, e deixando o sinal suave, ou seja,

$$\begin{aligned} \zeta_s(p_{\text{ag}}, p_{\text{inst}}, t) &= u_{0r} \sin(\omega t) - \frac{k_u}{2} [p_{\text{inst}}(t) \\ &\quad - 2p_{\text{ag}} \sin^2(\omega t)] \left[ \frac{k^2 \cos(\omega t)}{1 + k^2 \cos^2(\omega t)} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Apesar das vantagens apresentadas pela função de suavização no sinal de referência (equação 10) em relação à função  $\zeta_{\epsilon}$  (equação 8), o conteúdo harmônico ainda é considerável (Furtado, 2009).

### 3.3 Sinal de referência com parâmetro variável

Uma nova proposta consiste assumir que o parâmetro  $k_u$  é variável no tempo, ou seja,

$$k_u = k'_u \cos(\omega t), \quad (11)$$

em que  $k'_u$  representa o novo coeficiente de decaimento da tensão.

Nesse caso, pode-se reescrever a equação 2 como:

$$u_{\text{rm}} = u_{0r} - [k'_u \cos(\omega t)] p_r.$$

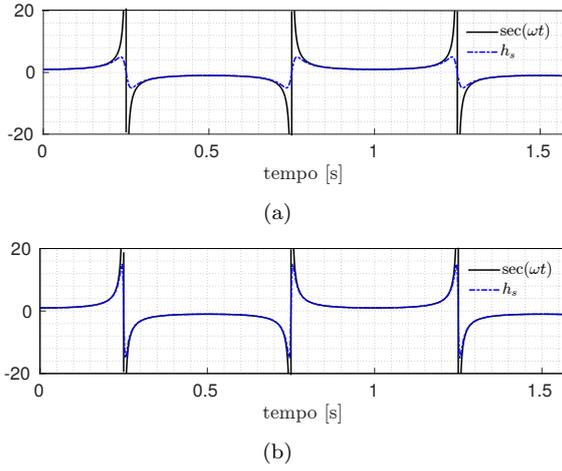


Figura 2: Comparação da evolução de  $\sec(\omega t)$  e  $h_s$ , conforme descrito pela equação 9, para (a)  $k = 10$  e (b)  $k = 30$ .

Isso é possível uma vez que a frequência do sinal de referência é conhecida e calculada pela equação 1.

Nesse contexto o sinal de referência pode ser reescrito como:

$$\begin{aligned} u_{rm}\text{sen}(\omega t) &= u_{0r}\text{sen}(\omega t) \\ &\quad - \frac{k_u}{2} [p_{inst}(t) - 2p_{ag}\text{sen}^2(\omega t)] \\ &= \zeta_v(p_{ag}, p_{inst}, t). \end{aligned} \quad (12)$$

Essa abordagem elimina as singularidades e a necessidade de suavização.

### 3.4 Modelo da UPS com sinal de referência

O esquemático mostrado na figura 1(b) pode ser alterado considerando a lei de controle proposta na equação 12, conforme ilustrado na figura 3. O modelo desse sistema completo é representado por

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\beta x_1 + \alpha x_2 - \alpha u_o(x_1), \\ \dot{x}_2 = -\gamma(x_1 - x_3), \\ \dot{x}_3 = -\sigma x_2 - \rho x_3 + \sigma u_f, \\ \dot{x}_4 = -\omega_f x_4 + \omega_f x_1 u_o(x_1), \\ \dot{x}_5 = -x_2 + \zeta_v(p_{ag}, p_{inst}, t), \end{cases} \quad (13)$$

em que  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  são correntes conforme representadas na figura 3,  $x_4 = p_{ag}$  e  $x_5$  é a saída do controlador PI. Além disso,

$$u_f = k_{iv} [k_p (\zeta_v(p_{ag}, p_{inst}, t) - x_2) + k_i x_5 - x_3]. \quad (14)$$

Os demais parâmetros são:  $\beta = \frac{r_a}{l_a}$ ,  $\alpha = \frac{1}{l_a}$ ,  $\gamma = \frac{1}{C_f}$ ,  $\sigma = \frac{1}{l_f}$  e  $\rho = \frac{r_f}{l_f}$ .  $k_{iv}$  é o ganho do sinal PWM e  $k_p$  e  $k_i$  são os parâmetros do controlador PI.

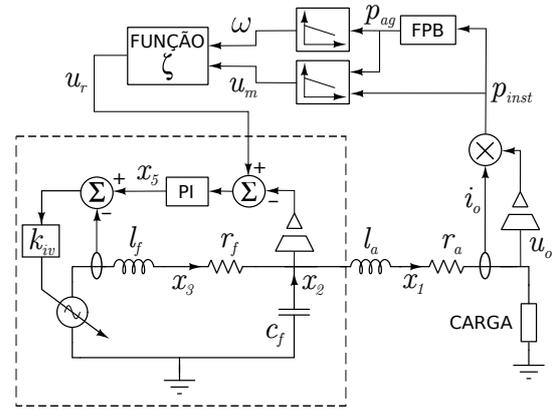


Figura 3: Esquemático completo com UPS e blocos de controle.

## 4 Simulações numéricas

Para validação por simulação computacional da lei de controle proposta, três cenários foram considerados. Avalia-se, em cada cenário, o compartilhamento das potências ativa e reativa entre duas UPS idênticas acopladas, conforme mostrado na figura 4(a), alimentando cargas resistiva (figura 4(b)), indutiva (figura 4(c)) e não linear (figura 4(d)).

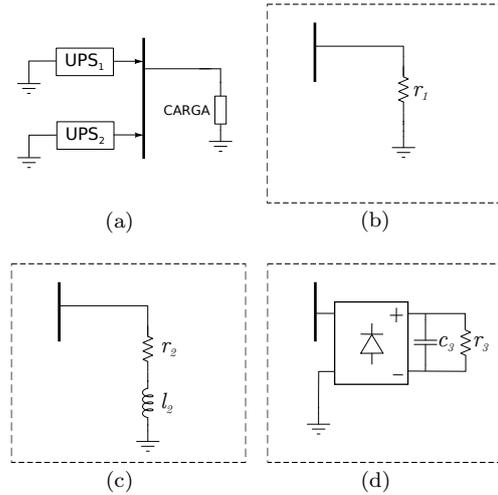


Figura 4: (a) Esquemático da conexão entre UPS e (b–d) cargas utilizadas nas simulações. Em (b) tem-se uma carga puramente resistiva. Em (c) uma carga indutiva e em (d) uma carga não linear, representada por um retificador de onda completa.

Esse acoplamento pode ser modelado por:

$$\text{UPS}_1 = \begin{cases} \dot{x}_{11} = -\beta x_{11} + \alpha x_{12} - \alpha u_o(x_{11}, x_{21}), \\ \dot{x}_{12} = -\gamma(x_{11} - x_{13}), \\ \dot{x}_{13} = -\sigma x_{12} - \rho x_{13} + \sigma u_{1f}, \\ \dot{x}_{14} = -\omega_f x_{14} + \omega_f x_{11} u_o(x_{11}, x_{21}), \\ \dot{x}_{15} = -x_{12} + \zeta_v(p_{1ag}, p_{1inst}, t), \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{UPS}_2 = \begin{cases} \dot{x}_{21} = -\beta x_{21} + \alpha x_{22} - \alpha u_o(x_{11}, x_{21}), \\ \dot{x}_{22} = -\gamma(x_{21} - x_{23}), \\ \dot{x}_{23} = -\sigma x_{22} - \rho x_{23} + \sigma u_{2f}, \\ \dot{x}_{24} = -\omega_f x_{24} + \omega_f x_{21} u_o(x_{11}, x_{21}), \\ \dot{x}_{25} = -x_{22} + \zeta_v(p_{2ag}, p_{2inst}, t), \end{cases} \quad (16)$$

em que  $x_{ij}$  representa o  $j$ -ésimo estado da  $i$ -ésima UPS. Além disso,

$$u_{1f} = k_{iv}[k_p(\zeta_v(p_{1ag}, p_{1inst}, t) - x_{12}) + k_i x_{15} - x_{13}],$$

$$u_{2f} = k_{iv}[k_p(\zeta_v(p_{2ag}, p_{2inst}, t) - x_{22}) + k_i x_{25} - x_{23}].$$

A tabela 1 apresenta os parâmetros do sistema e demais valores utilizados nas simulações computacionais.

Tabela 1: Parâmetros da análise numérica

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$r_f$	20 m $\Omega$	$\omega_{0r}$	2 $\pi$ 60 rad/s
$l_f$	1,2 mH	$u_{0r}$	127 $\sqrt{2}$ V
$c_f$	15 $\mu$ F	$k_u$	10 $^{-4}$
$r_a$	50 m $\Omega$	$k_\omega$	10 $^{-5}$
$l_a$	300 $\mu$ H	$r_1$	20 $\Omega$
$w_f$	2 $\pi$ 6 rad/s	$r_2$	20 $\Omega$
$k_p$	500	$l_2$	36 mH
$k_i$	5	$r_3$	20 $\Omega$
$k_{iv}$	1	$c_3$	12 mF

As simulações consideram uma única UPS alimentando a carga em cada cenário para  $t < 1$  s. Quando  $t = 1$  s, a segunda UPS é conectada ao barramento, dando início à operação paralela.

Pode-se perceber, pelas figuras 5, 6 e 7, que há um correto compartilhamento de potências para os três tipos de carga analisados.

A figura 8 mostra a tensão na saída da UPS 1 para cada uma das leis de controle apresentadas, em um cenário em que as UPS alimentam, juntas, a carga não linear (figura 4(d)). Graficamente, não nota-se diferença significativa nas tensões observadas devido aos pequenos valores de  $k_\omega$  e  $k_u$  que, por sua vez, causam pequenos desvios na amplitude e frequência da tensão a partir dos valores nominais definidos para o sistema.

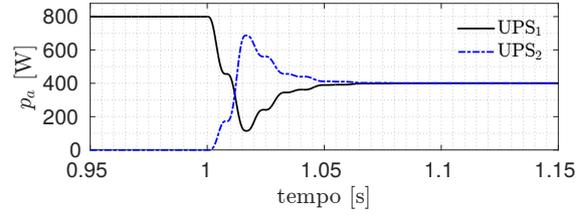
A tabela 2 mostra a distorção harmônica total (ANEEL, 2010) calculada para cada um dos sinais de tensão referentes às leis de controle  $\zeta_\epsilon$ ,  $\zeta_s$  e  $\zeta_v$ .

Tabela 2: Distorção Harmônica Total

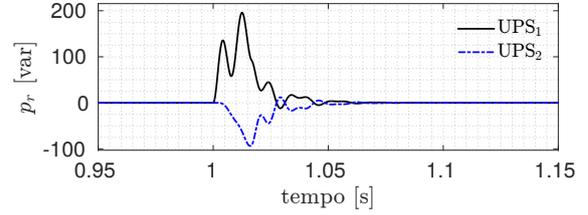
$\zeta_\epsilon$	$\zeta_s$	$\zeta_v$
3,6250%	3,6058%	3,5848%

## 5 Conclusões

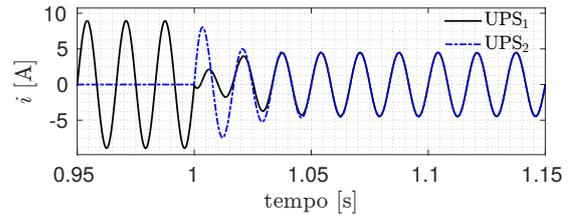
Este trabalho apresentou uma nova abordagem para curva de decaimento da potência reativa,



(a)



(b)



(c)

Figura 5: Compartilhamento de (a) potência ativa, (b) potência reativa e (c) correntes para uma carga puramente resistiva para o método de controle proposto.

para obtenção de um sinal de referência aplicável ao paralelismo de UPS.

O sinal proposto no trabalho apresentou sensível melhora no que tange ao conteúdo espectral do sinal resultante da aplicação da lei, bem como na implementação digital. Além da redução significativa na complexidade de uma possível análise de estabilidade, uma vez que o sinal de referência resultante não é dividido em regiões, bem como é suave.

Por meio de simulações computacionais comprovou-se a eficiência do sinal de referência proposto, para o caso de cargas resistiva, indutiva e não linear. É importante destacar a distribuição igualitária de potências demandadas pelas cargas entre as UPS, diante de diferentes tipos de carga, destacando-se a eficácia para cargas não lineares, mais comumente encontradas nesse contexto.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES - Brasil e da FAPEMIG.

## Referências

ANEEL (2010). *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional* -

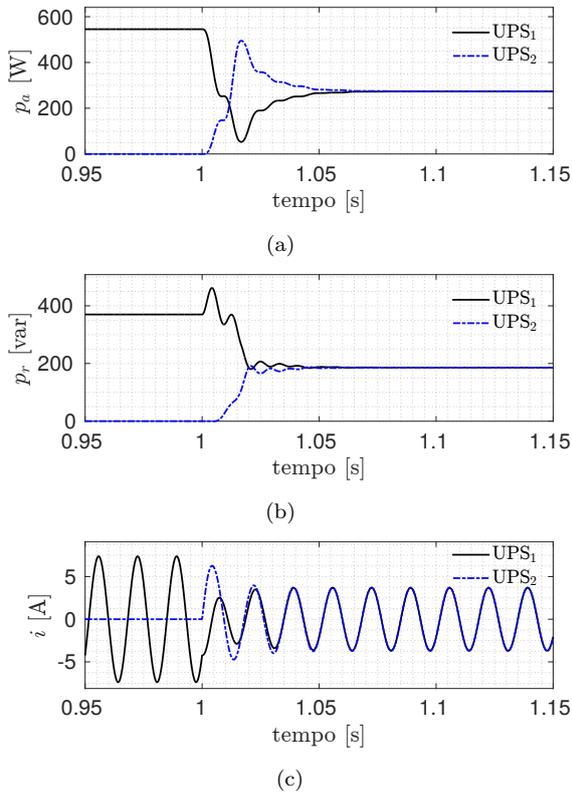


Figura 6: Compartilhamento de (a) potência ativa, (b) potência reativa e (c) correntes para uma carga indutiva para o método de controle proposto.

*PRODIST*, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

- Chen, J.-F. e Chu, C.-L. (1995). Combination voltage-controlled and current-controlled pwm inverters for ups parallel operation, *IEEE Transactions on Power Electronics* **10**(5): 547–558.
- Cheng, Y. J. e Sng, E. K. K. (2006). A novel communication strategy for decentralized control of paralleled multi-inverter systems, *IEEE Transactions on power electronics* **21**(1): 148–156.
- Coelho, E. A. A., Cortizo, P. C. e Garcia, P. F. D. (2002). Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone ac supply systems, *IEEE Transactions on Industry Applications* **38**(2): 533–542.
- Elgerd, O. I. (1978). *Introdução à teoria de sistemas de energia elétrica*, McGraw-Hill do Brasil.
- Furtado, E. C. (2009). *Estudo do Sincronismo de Múltiplos Osciladores Acoplados: Aplicação ao Paralelismo de UPS*, PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.

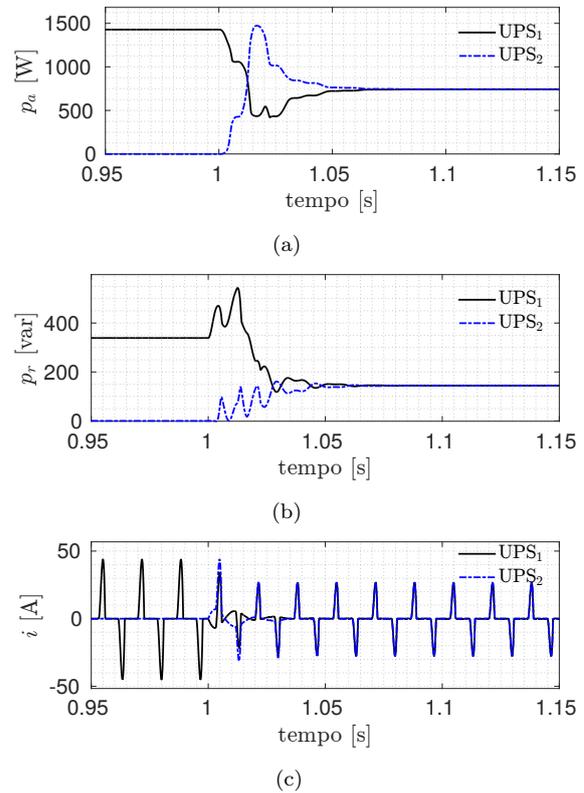


Figura 7: Compartilhamento de (a) potência ativa, (b) potência reativa e (c) correntes para uma carga não linear, para o método de controle proposto. Cargas não lineares são mais comumente encontradas em sistemas UPS.

- Furtado, E. C., Aguirre, L. A. e Tôres, L. A. (2008). Ups parallel balanced operation without explicit estimation of reactive power—a simpler scheme, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs* **55**(10): 1061–1065.
- Guerrero, J. M., de Vicuña, L. G., Matas, J. e Miret, J. (2002). Steady-state invariant-frequency control of parallel redundant uninterruptible power supplies, *IECON 02 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the]*, Vol. 1, IEEE, pp. 274–277.
- Heinemann, L. e Jamil, S. (2016). It’s all about reliability—commercial versus industrial ups for petrochemical & offshore applications, *Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), 2016*, IEEE, pp. 1–10.
- Rahmat, K., Jovanovic, S. e Lo, K. L. (2013). Reliability comparison of uninterruptible power supply (ups) system configurations, *Telecommunications Energy Conference’Smart Power and Efficiency’(INTELEC), Proceedings of 2013 35th International*, VDE, pp. 1–6.

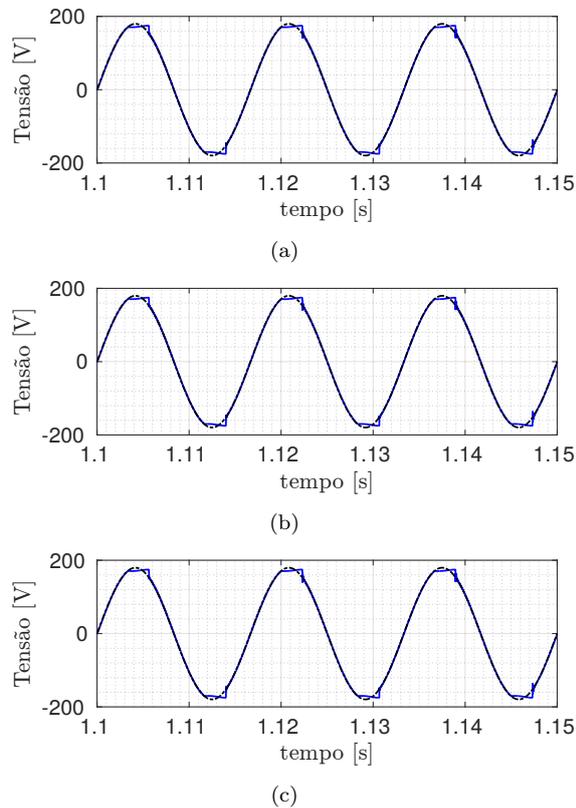


Figura 8: (--) Sinal de tensão ideal e (—) tensão na saída da UPS 1 para simulação com carga não linear para as leis de controle (a)  $\zeta_\epsilon$ , (b)  $\zeta_s$  e (c)  $\zeta_v$ .

*Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2015 IEEE International*, IEEE, pp. 1–4.

Ye, Y., Zhou, K., Zhang, B., Wang, D. e Wang, J. (2006). High-performance repetitive control of pwm dc-ac converters with real-time phase-lead fir filter, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs* **53**(8): 768–772.

Sato, E. K. e Kawamura, A. (2005). High reliability and high performance parallel-connected ups system with independent control, *Telecommunications Conference, 2005. INTELEC'05. Twenty-Seventh International*, IEEE, pp. 389–394.

Sun, X., Lee, Y.-S. e Xu, D. (2003). Modeling, analysis, and implementation of parallel multi-inverter systems with instantaneous average-current-sharing scheme, *IEEE Transactions on Power Electronics* **18**(3): 844–856.

Tuladhar, A., Jin, H., Unger, T. e Mauch, K. (1997). Parallel operation of single phase inverter modules with no control interconnections, *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1997. APEC'97 Conference Proceedings 1997., Twelfth Annual*, Vol. 1, IEEE, pp. 94–100.

Wu, T.-F., Chen, Y.-K. e Huang, Y.-H. (2000). 3c strategy for inverters in parallel operation achieving an equal current distribution, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **47**(2): 273–281.

Xiaofei, Z., Zhen, W. e Zhou, S. (2015). How to ensure the modular ups with high reliability,