

## ESTIMAÇÃO DE TENSÃO E CORRENTE NA CARGA DE UM SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA INDUTIVA DE POTÊNCIA

Celton Ribeiro Barbosa<sup>1\*</sup>, Raphaela Nunes Pereira<sup>2</sup>, Azauri Albano de Oliveira Júnior<sup>3</sup>

1. Pós Graduando Em Engenharia Elétrica - EESC – USP, Professor do IFBA

2. Graduanda em Engenharia Elétrica – IFBA

3. Professor do Departamento de Engenharia Elétrica e Computação – EESC-USP

### Resumo:

Este trabalho apresenta uma técnica para estimar a tensão e a corrente na carga de um sistema de Transferência Indutiva de Potência (TIP) utilizando medidas de tensão e corrente em elementos do circuito primário. Uma das grandes vantagens é a redução dos custos e da complexidade do sistema, pois não será mais necessário um sistema de comunicação que forneça os valores de tensão e corrente da carga para o controlador no lado primário. Os resultados mostram que a metodologia proposta é eficiente porque os valores estimados e reais são muitos similares. Como a técnica é baseada num pequeno número de equações, os processamentos das ações de controle são rápidos e isto é importante, pois, sistemas TIP operam em altas frequências.

**Palavras-chave:** Controle PI; Recarga de bateria; Transferência de energia sem fio.

### Introdução:

A Transferência Indutiva de Potência (TIP) é uma maneira de se realizar a transferência de energia elétrica sem fio e tem se popularizado muito atualmente. Pois, a recarga de baterias com TIP permite a popularização de diversos equipamentos elétricos tais como, celulares, implantes biomédicos e veículos elétricos [1]. Encontra-se na Figura 1 um exemplo de sistema TIP que consiste em um lado primário e um lado secundário. O lado primário é responsável por gerar um campo magnético alternado, numa frequência geralmente maior que 10 kHz [2] através do indutor emissor ( $L_p$ ). O indutor receptor ( $L_s$ ) está acoplado magneticamente com  $L_p$  e fornece energia ao circuito presente no lado secundário. O meio entre os indutores  $L_p$  e  $L_s$  não é sólido (geralmente é o ar) e a posição espacial relativa entre eles pode variar. Isto implica na alteração da indutância mútua ( $M$ ) e portanto, é necessária a implementação de um controlador no lado primário ou secundário (ou em ambos os lados) para garantir tensões e/ou correntes adequadas na carga.

Alguns trabalhos com TIP adotam o controle somente no lado primário e utilizam um sistema de comunicação sem fio para fornecer os valores reais da tensão ( $V_o$ ) e corrente ( $I_o$ ) na carga para o controlador. O controlador somente no lado primário reduz o custo total do sistema, a complexidade e o tamanho. Além disso, aumenta a eficiência e a confiabilidade [3]. Porém, o sistema de comunicação sem fio aumenta a complexidade do projeto e para resolver este problema alguns artigos tais como [3],[4],[5],[6], vem propondo técnicas de estimação de  $V_o$  e  $I_o$  no lado primário para elimina-lo.

O sistema TIP presente na Figura 1, sem o controlador, foi proposto em [7] e o trabalho em [8] apresenta um estudo que concluiu que o sistema é robusto e adequado nas situações que ocorrem variações de  $M$ ,  $L_p$  e  $L_s$ . Ainda não foi encontrado na literatura uma técnica de estimação para esse tipo de sistema. Portanto, o objetivo deste trabalho é propor uma maneira de estimar  $V_o$  e  $I_o$  no sistema presente na Figura 1, utilizando medidas de tensão e corrente em elementos do circuito primário.

### Metodologia:

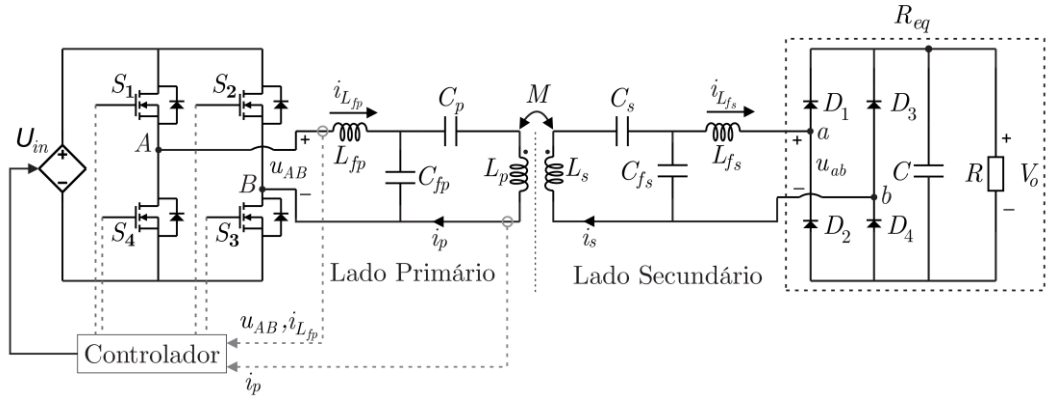
A Figura 1 apresenta o sistema TIP desenvolvido em [7] e a nova proposta de controlador, que estima e regula  $V_o$  e  $I_o$ . Assim, o princípio de funcionamento é baseado na medição dos valores das correntes nos indutores  $L_{fp}$  e  $L_p$  e do primeiro harmônico da tensão de saída do inversor de frequência ( $U_{AB}$ ). Em seguida os valores estimados são fornecidos para um controlador PI que altera a tensão contínua de entrada do inversor ( $U_{in}$ ) para regular os valores de  $V_o$  e  $I_o$ .

- Estimando a tensão na carga:

$$I_{L_{fp\_1st}} = \frac{kU_{ab}\sqrt{L_p L_s}}{\omega_0 L_{fp} L_{fs}} - j \frac{U_{ab}^2 \left( \frac{\Delta L_{e2}}{L_{fs}} - \frac{1}{4} \right)}{\omega_0 L_{fs}} \quad (1)$$

Quando o sistema é ajustado pra obter *Zero Voltage Switing* (ZVS) o fasor do primeiro harmônico da corrente em  $L_{fp}$  é dado por (1) [7]. A variável  $k$  é o coeficiente de acoplamento entre  $L_p$  e  $L_s$ ,  $U_{AB}$  a amplitude do primeiro harmônico da tensão de saída do inversor,  $\omega_0$  frequência angular da corrente em  $L_p$ ,  $U_{ab}$  a

amplitude do primeiro harmônico da tensão de entrada no retificador,  $\Delta L_{e2}$  uma constante definida para garantir ZVS. Portanto, é possível estimar  $U_{ab}$  obtendo a parte imaginária de (1) e o valor de  $U_{AB}$  e logo em seguida encontrar  $V_o$ .



**Figura 1.** Sistema TIP com nova proposta de estimação e controle de tensão na carga.

Considerando que os primeiros harmônicos das corrente nos indutores  $L_{fp}$  e  $L_p$  sejam iguais a [7]:

$$i_{L_{fp\_1st}} = \sqrt{2} I_{L_{fp\_1st}} \cos(\omega_0 t - \beta) \quad (2)$$

$$i_{p\_1st} = \sqrt{2} I_p \cos(\omega_0 t - \pi/2) \quad (3)$$

onde  $I_{L_{fp\_1st}}$  e  $I_p$  são os valores eficazes das correntes.

O produto entre  $i_{L_{fp\_1st}}$  e  $i_{p\_1st}$  é

$$i_{L_{fp\_1st}} \cdot i_{p\_1st} = 2 I_{L_{fp\_1st}} I_p \cos(\omega_0 t - \beta) \cos(\omega_0 t - \pi/2) \quad (4)$$

Aplicando a identidade trigonométrica

$$\cos(A) \cos(B) = \frac{1}{2} [\cos(A - B) + \cos(A + B)] \quad (5)$$

$$i_{L_{fp\_1st}} \cdot i_{p\_1st} = -I_{L_{fp\_1st}} I_p \sin(\beta) + I_{L_{fp\_1st}} I_p \cos(2\omega_0 t - \beta - \pi/2) \quad (6)$$

Considerando que a componente constante ou CC de (6) é dada por:

$$I_{CC} = -I_{L_{fp\_1st}} I_p \sin \beta \quad (7)$$

$$I_p = \frac{U_{AB}}{\omega_0 L_{fp}} \quad (8)$$

O valor de  $I_p$  é encontrado com (8) [7], logo

$$I_{L_{fp\_1st}} \sin(\beta) = -I_{CC} \cdot \frac{\omega_0 L_{fp}}{U_{AB}} \quad (9)$$

O valor de  $I_{CC}$  pode ser obtido utilizando um filtro passa baixa na saída do sinal resultante de  $i_{L_{fp\_1st}} \cdot i_{p\_1st}$  que em seguida é substituído em (9) para encontrar o valor da parte imaginária de (1).

$$U_{ab\_estimado} = \sqrt{\frac{I_{L_{fp\_1st}} \sin(\beta) \cdot \omega_0 L_{fs} \cdot U_{AB}}{\frac{\Delta L_{e2}}{L_{fs}} - \frac{1}{4}}} \quad (10)$$

Portanto, o valor estimado de  $U_{ab}$  pode ser encontrado com (10) e desprezando a queda de tensão nos diodos do retificador tem-se que a tensão estimada na carga ( $V_{o\_est}$ ) é dada por:

$$V_{o\_est} = \frac{\pi\sqrt{2}}{4} U_{ab\_estimado} \quad (11)$$

- **Estimando a corrente na carga:**

Se as perdas no sistema são desprezíveis, o valor da corrente na carga pode ser estimado com  $V_{o\_est}$  e a potência ativa que esta sendo fornecida pelo inversor ( $P$ ). Considerando que os primeiros harmônicos da tensão e corrente fornecida pelo inversor são iguais a:

$$u_{AB1st} = \sqrt{2} U_{AB} \cos(\omega t)$$

$$i_{Lfp\_1st} = \sqrt{2}I_{Lfp\_1st} \cos(\omega t - \beta)$$

onde  $U_{AB}$  e  $I_{Lfp\_1st}$  são os valores eficazes da tensão e corrente respectivamente.

Tem-se que a potência instantânea é

$$u_{AB1st} \cdot i_{Lfp1st} = 2U_{AB}I_{Lfp1st} \cos(\omega t) \cos(\omega t - \beta) \quad (11)$$

Utilizando a identidade trigonométrica

$$\cos(A) \cos(B) = \frac{1}{2} [\cos(A - B) + \cos(A + B)]$$

Obtém-se

$$u_{AB1st} \cdot i_{Lfp1st} = U_{AB}I_{Lfp1st} \cos(-\beta) + U_{AB}I_{Lfp1st} \cos(2\omega t - \beta) \quad (12)$$

$$P = U_{AB}I_{Lfp1st} \cos(-\beta) \quad (13)$$

$$I_{o\_est} = \frac{P}{V_{o\_est}} \quad (14)$$

A potência ativa é igual a componente CC de (12) e portanto a corrente estimada é obtida com (14).

### Resultados e Discussão:

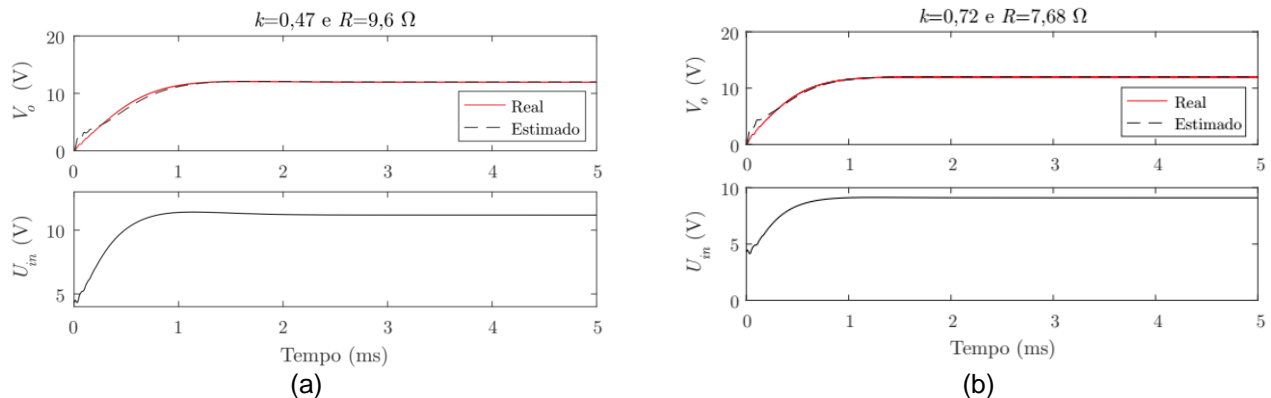
Para validar a proposta de estimação deste trabalho, o circuito presente na Figura 1 foi simulado no programa SIMULINK considerando os dados da Tabela 1.

**Tabela 1.** Valores das capacitâncias e indutâncias nos circuitos primário e secundário além dos ganhos proporcional ( $K_p$ ) e integrativo ( $K_i$ ) do PI utilizados no sistema TIP presente na Figura 1.

Primário		Secundário		Ganhos do PI		Controle de tensão	Controle de Corrente
Variável	Valor	Variável	Valor	$K_p$		0,35	3
$L_p$	28,25 $\mu$ H	$L_s$	28,23 $\mu$ H	$K_i$		2200	15000
$L_{fp}$	13,49 $\mu$ H	$L_{fs}$	13,3 $\mu$ H				
$C_{fp}$	260 nF	$C_{fs}$	263,6 nF				
$C_p$	237,5 nF	$C_s$	332,15 nF				
		$C$	24,4 $\mu$ F				
		$\Delta L_{e2}$	4,375 $\mu$ H				

Fonte: Elaborada pelos autores.

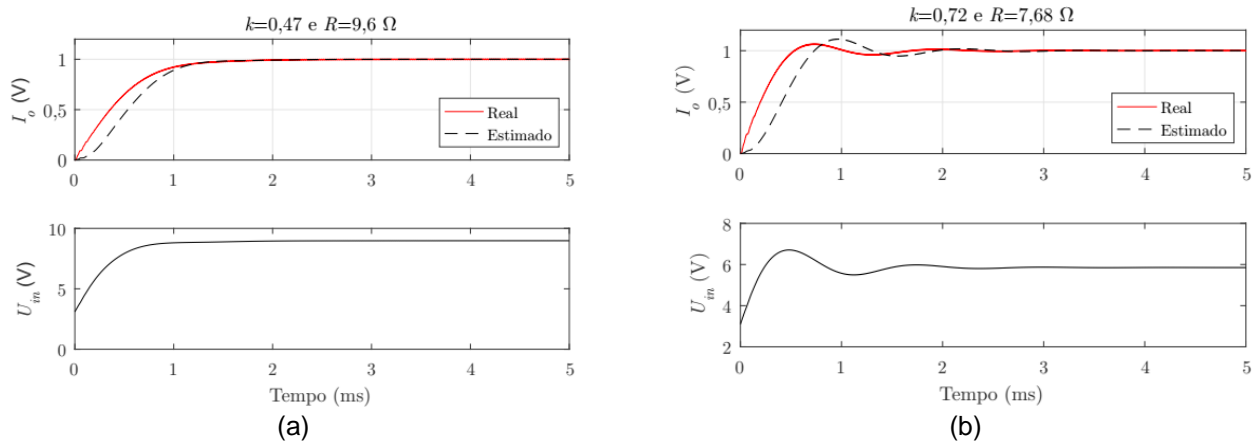
A Figura 2 apresenta os resultados da simulação da tensão estimada na carga considerando que a tensão de referência é de 12 V. Como pode-se observar  $V_{o\_est}$  é muito similar ao valor real inclusive no período transitório.



**Figura 2.** Resultados de simulação da tensão real ( $V_o$ ) e estimada ( $V_{o\_est}$ ) na carga e da tensão de entrada no inversor de frequência ( $U_{in}$ ) considerando uma tensão de referência de 12 V.

Os valores simulados da corrente estimada e real na carga considerando um valor de referência de 1 A se encontram na Figura 3 e eles não são similares no período transitório. Porém, isto é esperado pois toda as equações apresentadas neste trabalho consideram somente o sistema em regime permanente. Entretanto, os

erros presentes no período transitório não afetaram o desempenho do controlador e em regime permanente a corrente estimada é muito similar à real.



**Figura 3.** Resultados de simulação da corrente real ( $I_o$ ) e estimada ( $I_{o\_est}$ ) na carga e da tensão de entrada no inversor de frequência ( $U_{in}$ ) considerando uma corrente de referência de 1 A.

Fica muito claro também nas Figuras 2 e 3 que os valores estimados são muito similares aos reais mesmo diante de variações de  $k$  e da resistência da carga. Esta característica é importante em sistemas TIP para recarga de baterias, pois a bateria pode ser considerada uma resistência variável durante a recarga. Como a grande maioria das aplicações com TIP são utilizadas para recarga de baterias a nova proposta de estimação e controle é uma boa alternativa para redução de custo e popularização desta tecnologia.

### Conclusões:

Este trabalho apresenta uma técnica de estimação de tensão e corrente na carga de um sistema TIP utilizando um pequeno conjunto de equações. Isto é interessante porque minimiza a quantidade de linhas de código executados nos controladores, o que implica em ações de controle executadas em tempos mais curtos. Isto é necessário porque sistemas TIP operam em altas frequências.

Os resultados de simulação demonstram que o sistema proposto é eficiente e os valores reais e estimado são similares em uma ampla faixa de tempo. O controle conseguiu regular a tensão e a corrente na carga e portanto, a técnica proposta pode ser uma alternativa para minimizar os custos e a complexidade dos sistemas TIP.

### Referências bibliográficas

- [1] Z. Bi, T. Kan, C. C. Mi, Y. Zhang, Z. Zhao, and G. A. Keoleian, "A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility," **Appl. Energy**, vol. 179, pp. 413–425, Oct. 2016.
- [2] R. C. Fernandes and A. A. J. Oliveira, "Tópicos selecionados sobre o estado-da-arte em transferência indutiva de potência," **Eletrônica de Potência**, vol. 19, pp. 58–71, 2014.
- [3] D. J. Thrimawithana and U. K. Madawala, "A primary side controller for inductive power transfer systems," in **2010 IEEE International Conference on Industrial Technology**, 2010, pp. 661–666.
- [4] M. Zaheer, J. S. Suri, and H. B. Nemade, "Primary side control based inductively coupled powering scheme for biomedical implants," in **Proceedings of 2012 IEEE-EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics**, 2012, vol. 25, no. Bhi, pp. 174–179.
- [5] L. P. Di Noia, L. Piegari, and R. Rizzo, "Evaluation of voltages and currents in an IPT system through Kalman Filter," in **5th IET International Conference on Renewable Power Generation (RPG) 2016**, 2016, vol. 2016, p. 65 (6.)-65 (6.).
- [6] J. P. W. Chow and H. S. H. Chung, "Use of primary-side information to perform online estimation of the secondary-side information and mutual inductance in wireless inductive link," in **2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**, 2015, vol. 2015–May, no. May, pp. 2648–2655.
- [7] S. Li, W. Li, J. Deng, T. D. Nguyen, and C. C. Mi, "A Double-Sided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer," **IEEE Trans. Veh. Technol.**, vol. 64, no. 6, pp. 2261–2273, Jun. 2015.
- [8] W. Li, H. Zhao, J. Deng, S. Li, and C. C. Mi, "Comparison Study on SS and Double-Sided LCC Compensation Topologies for EV/PHEV Wireless Chargers," **IEEE Trans. Veh. Technol.**, vol. 65, no. 6, pp. 4429–4439, Jun. 2016.