

3.04.03 - Engenharia Elétrica / Circuitos Elétricos, Magnéticos e Eletrônicos
**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE CIRCUITOS DE POTÊNCIA APLICADOS À
ELETROESTIMULAÇÃO FUNCIONAL**

Ana Beatriz N. Rubião Graça¹, Sara Del Vecchio², Márcio do Carmo B. P. Rodrigues³

1. Acadêmica do curso de Engenharia Mecatrônica do IF Sudeste MG
2. Coorientadora, Grupo de Tecnologias Aplicadas à Saúde, IF Sudeste MG
3. Orientador, Grupo de Tecnologias Aplicadas à Saúde, IF Sudeste MG

Resumo

A eletroestimulação funcional (FES) é uma técnica que vem sendo aplicada no auxílio de restauração de movimentos e tratamento de certas disfunções, por exemplo, em pacientes que sofreram lesão medular. O objetivo deste trabalho é comparar as tensões sintetizadas em circuitos de potência de sistemas FES que apresentem acoplamento com transformador elevador. A análise foi realizada a partir da simulação computacional de três circuitos encontrados na literatura técnica. Os resultados obtidos possibilitaram identificar o tipo de sinal sintetizado em cada topologia analisada. Em todos os casos, foram obtidos pulsos monofásicos para aplicação em eletroestimulação, que embora sejam utilizados em sistemas FES, podem produzir desconforto ao usuário (paciente). Assim, o trabalho aponta para a necessidade de análise e síntese de circuitos de potência com capacidade de geração de sinais mais adequados para a aplicação considerada.

Palavras-chave: sinais bifásicos e monofásicos; circuitos eletrônicos com acoplamento por transformador; síntese de correntes para estimulação elétrica.

Apoio financeiro: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Trabalho selecionado para a JNIC: IF Sudeste MG/Campus Juiz de Fora.

Introdução

A eletroestimulação é uma técnica que consiste na aplicação de pulsos de corrente elétrica, por meio de eletrodos, com o objetivo de estimular músculos, nervos e/ou tecidos, auxiliando na restauração de movimentos, redução de dores e tratamento de certas disfunções (YAMAGUTI e PAZ, 2009). Quando a aplicação ocorre durante a contração do músculo ao realizar atividades funcionais, o procedimento é chamado de eletroestimulação funcional (FES, do inglês *functional electrical stimulation*) (RIBEIRO, 2020). A utilização de sistemas FES visa gerar contração muscular de modo a restaurar movimentos funcionais no sistema musculoesquelético (CHENG et al., 2004), tornando-se uma técnica promissora para marcha assistida com ganho de volume e força muscular em crianças com paralisia cerebral unilateral (POOL et al., 2016) ou indivíduos com deformidades nos pés (BÖHM et al., 2020) ou acometidos por acidente vascular cerebral com dificuldades de controle de tornozelo (YANG et al., 2018).

O estímulo gerado por esse tipo de sistema recruta todas as unidades motoras de um músculo, diferentemente da estimulação normal do sistema nervoso central (SNC), que recruta uma por vez (LYNCH, 2011). Por essa razão, a frequência necessária para o estímulo do SNC é menor do que àquela realizada por um sistema FES; enquanto a primeira é na faixa de 6 a 8 Hz, a última é de 20 a 40 Hz. Como a resistência elétrica da pele pode sofrer variações, estímulos de corrente são mais comumente utilizados nos sistemas FES, garantindo que a energia desejada seja transferida (LYNCH, 2011). Para a realização da eletroestimulação funcional, diferentes formas de onda podem ser aplicadas, como mostra a Fig. 1 (FLORES, 2019).

Uma forma comum de síntese de um circuito eletrônico para aplicações em FES é por meio da utilização de um oscilador para gerar o pulso necessário de forma analógica e um *driver* (circuito de potência) acoplado por transformador elevador na saída para aumentar a tensão aplicada ao paciente (CHENG et al. 2004). Assim, este trabalho visa comparar as características e as formas de onda de tensão obtidas em circuitos de potência com acoplamento por transformador presentes na literatura técnica.

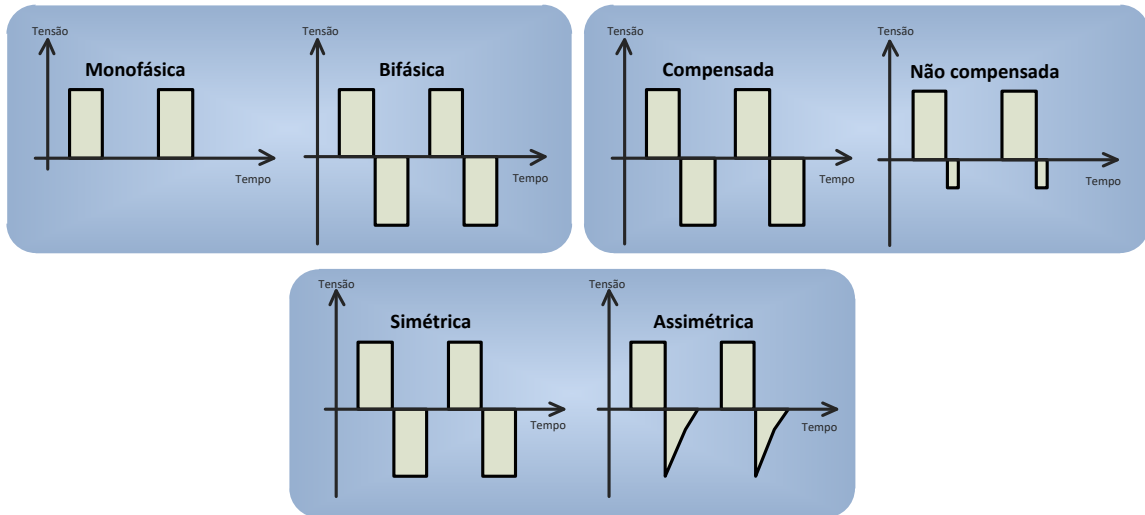


Fig. 1. Formas de ondas para sistemas FES.

Metodologia

Após revisão bibliográfica, considerando a relevância dos trabalhos, foram selecionados três circuitos para análise do sinal de saída, sendo eles: Cheng et al. (2004), Velloso e Souza (2007) e Chen et al. (2013). Os três apresentam como característica comum o acoplamento entre circuito gerador de sinais e pele realizado por transformador, cujo primário é conectado a um transistor, resultando em elevada tensão pulsada no secundário, que impõe o fluxo de corrente desejado no paciente. Estes circuitos são mostrados na Fig. 2.

Além da análise das características de cada circuito, foram conduzidas simulações computacionais, utilizando o *software* PSIM, visando avaliar o comportamento de seus sinais de saída. Como sinal de excitação, foi utilizada, em cada circuito, uma fonte de tensão de forma de onda quadrada, bifásica, com frequência de 40 Hz e amplitude de 12 V de pico. Como carga, utilizou-se resistor de 10 k Ω , como na aproximação de Lima e Cordeiro (2002), que apresenta modelo orientado a circuito para simulação da interação entre o estímulo elétrico e pele do paciente.

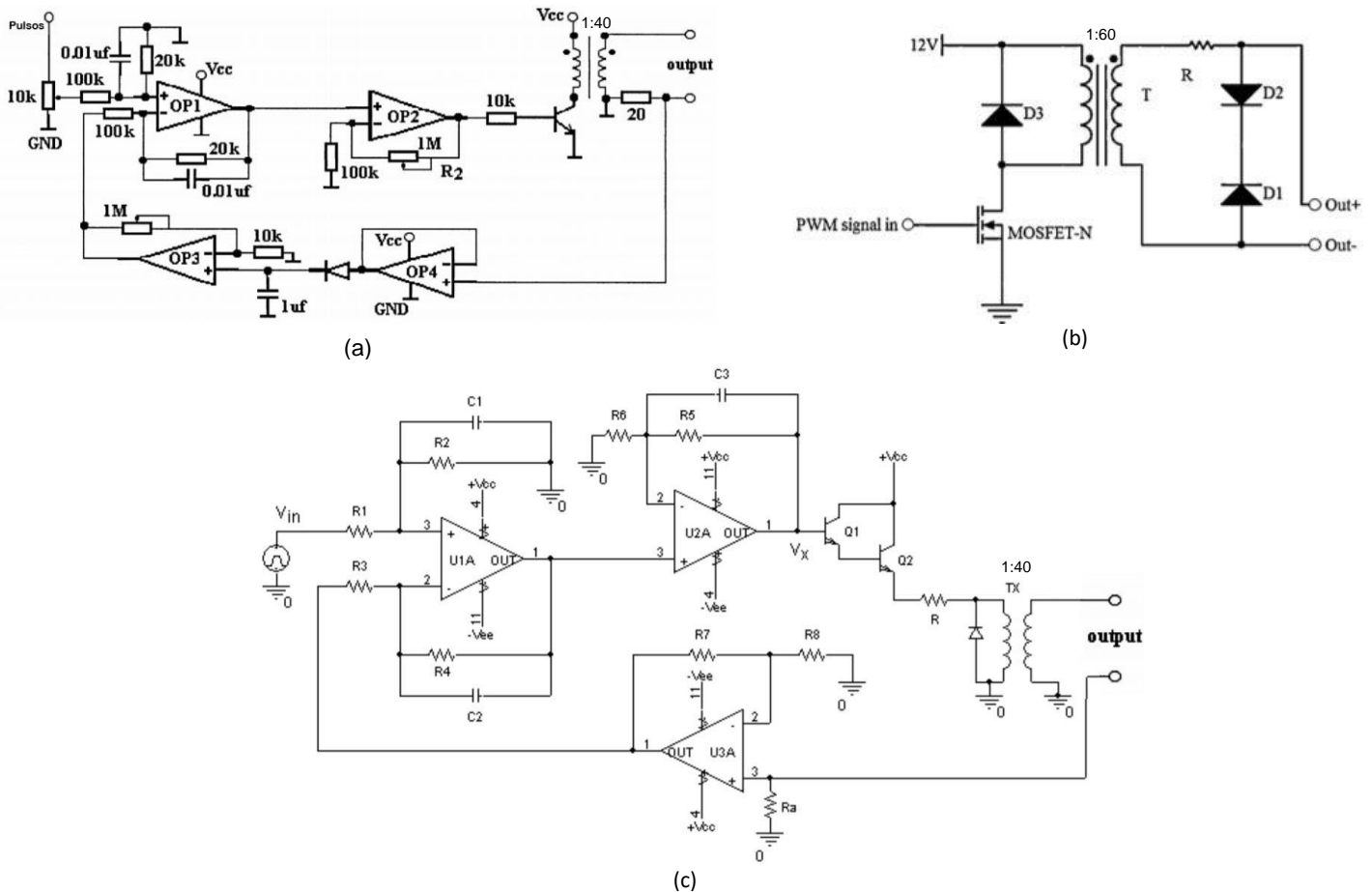


Fig. 2. Circuitos considerados na análise, apresentados em: (a) Cheng et al. (2004), (b) Chen et al. (2013) e (c) Velloso e Souza (2007).

Resultados e Discussão

Cheng et al. (2004) apresenta uma estrutura de realimentação para fazer com que a corrente na saída tenha a mesma forma de onda aplicada na entrada, utilizando um comparador para realizar o controle. Velloso e Souza (2007) utilizaram a topologia anterior com algumas pequenas modificações, utilizando um circuito amplificador de erro para melhorar o controle entre corrente de saída e tensão de entrada. Ambos os circuitos utilizam transistor bipolar de junção para comutação do sinal aplicado ao transformador de acoplamento, sendo que o segundo considera o uso de um par Darlington. Isto possibilita aumentar consideravelmente a corrente aplicada no primário do transformador de acoplamento e, conseqüentemente, aumentar a potência transferida para seu secundário.

Já Chen et al. (2013) utilizam um transistor de efeito de campo de óxido de semicondutor e metal (MOSFET) conectado ao primário do transformador de acoplamento, o que possibilita grande redução da potência necessária na excitação do circuito amplificador. Além disso, há dois diodos que formam um circuito limitador de tensão, conectados ao secundário do transformador. A intensidade da estimulação aplicada ao paciente é variada por meio da largura do pulso do sinal de tensão aplicado à base do MOSFET.

As tensões de saída obtidas nas simulações dos três circuitos considerados são apresentadas na Fig. 3. Durante as simulações, verificou-se a variação da tensão de saída em função da variação da resistência de carga nos circuitos apresentados por Chen et al. (2004) e Velloso e Souza (2007), justificando o uso de uma malha de controle de corrente de estimulação. Ambos os circuitos utilizam um resistor de baixo valor de resistência conectado em série aos eletrodos, por meio do qual é medida a corrente de estimulação e realimentada utilizando amplificadores operacionais.

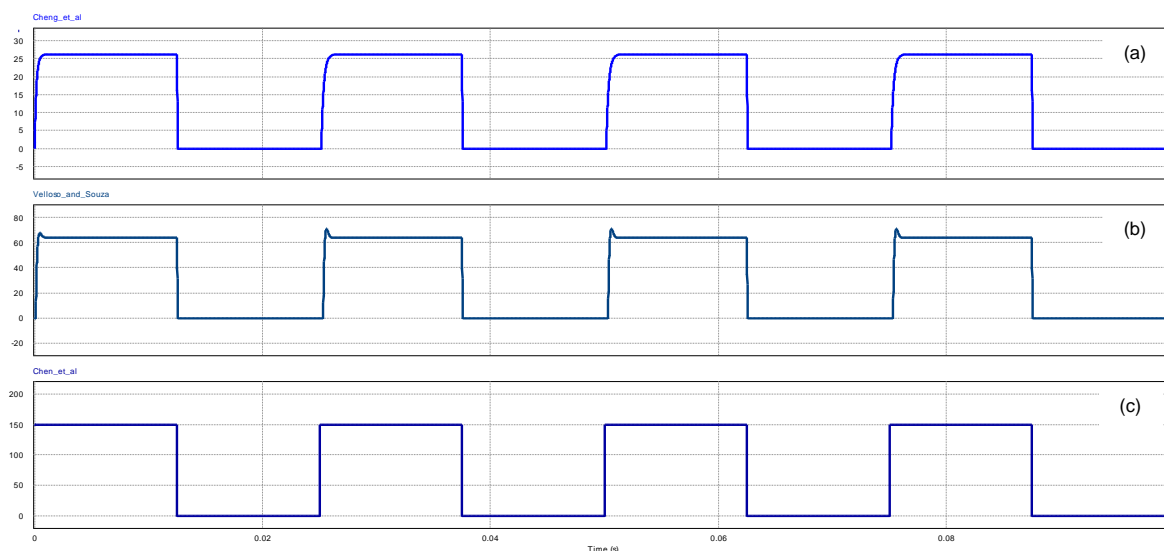


Fig. 3. Sinais de tensão de saída:
(a) Cheng et al. (2004), (b) Velloso e Souza (2007) e (c) Chen et al. (2013).

Os sinais de tensão encontrados foram monofásicos retangulares, tendo Cheng et al. (2004) apresentado o menor valor de tensão de saída, com pico em 26,23 V, enquanto os demais, Velloso e Souza (2007) e Chen et al. (2013), apresentaram 64,32 V e 150 V, respectivamente, para a mesma excitação de entrada. Embora os circuitos de Cheng et al. (2004) e Velloso e Souza (2007) sejam apresentados como capazes de sintetizar saídas bifásicas, estas não são bem definidas, sendo resultado da não idealidade do transformador de acoplamento. Além disso, para que a saída do circuito de Velloso e Souza (2007) apresente tensão bifásica, é necessária a remoção do diodo de livre circulação conectado ao primário do transformador de acoplamento.

Para evitar processos galvânicos e conseqüente dano no tecido, prefere-se ondas do tipo bifásicas compensadas (como a exibida na Fig. 1), pois estas apresentam carga líquida nula, de modo que a carga transferida durante a estimulação seja imediatamente retirada pela parte negativa do pulso. Portanto, mesmo que os circuitos apresentados possam ser aplicados a sistemas FES, suas configurações não fornecem o formato ideal de pulsos que garanta o maior conforto ao paciente.

Conclusões

As topologias de circuitos de potência para sistemas FES, consideradas neste trabalho, baseadas em acoplamento por transformador, são capazes de impor as tensões e correntes necessárias para a realização da eletroestimulação funcional. Entretanto, tais configurações não são capazes de sintetizar sinais de estimulação com forma de onda bifásica compensada, que é associada ao maior conforto do usuário (paciente) e, portanto, mais usuais nos sistemas comerciais existentes.

Logo, o trabalho aqui proposto aponta para a necessidade da busca por literatura correlata em que sejam utilizados circuitos de potência com capacidade de síntese de sinais de forma de onda bifásica compensada,

bem como apresentem uma proposição de novos circuitos e estratégias de controle que sejam adequados e seguros para a realização de eletroestimulação funcional, contribuindo para o controle da espasticidade, aumento e/ou manutenção da amplitude de movimento articular e no tratamento de atrofia relacionadas ao desuso.

Referências bibliográficas

- BÖHM, Harald; DÖDERLEIN, Leonhard; DUSSA, Chakravarty U. Functional electrical stimulation for foot drop in the upper motor neuron syndrome: does it affect 3D foot kinematics during the stance phase of walking? *Fuß & Sprunggelenk*, 2020.
- CHEN M, WU B, Lou X, ZHAO T, LI J, XU Z, HU X, ZHENG X. A self-adaptive foot-drop corrector using functional electrical stimulation (FES) modulated by tibialis anterior electromyography (EMG) dataset. *Medical Engineering & Physics*, v.35, n.2; p.195-204, 2013.
- CHENG KWE, LU Y, TONG KY, RAD AB, CHOW DHK, Sutanto D. Development of a circuit for functional electrical stimulation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, v.12, n.1, p.43-47, 2004.
- FLORES, R. F. C. Desarrollo de un Sistema Portátil de Estimulación Eléctrica Funcional (FES) para Pacientes con Síndrome de Pie Caído. Pontificia Universidad del Perú. Lima, p.103. 2019.
- LIMA, J. A., CORDEIRO, A. S. A Low-Cost Neurostimulator With Accurate Pulsed-Current Control. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v.49, n.5, p. 497-500, May, 2002.
- LYNCH, C. L. Closed-Loop Control of Electrically Stimulated Skeletal Muscle Contractions. University of Toronto. Toronto, p. 132. 2011.
- MARTÍN, J. M. R., Corrientes más utilizadas en electroterapia. *Electroterapia en Fisioterapia*. 3ª Ed. Médica Panamericana, pp. 35-64.
- POOL, Dayna et al. Neuromuscular electrical stimulation-assisted gait increases muscle strength and volume in children with unilateral spastic cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, v. 58, n. 5, p. 492-501, 2016.
- RIBEIRO, R. M. Órtese de estimulação elétrica funcional para atuação no músculo gastrocnêmio em crianças e adolescentes com paralisia cerebral. Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais. Juiz de Fora, p.74. 2020.
- VELLOSO J.B., SOUZA M.N. A programmable system of functional electrical stimulation (FES). In: *Proceedings of the 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS; 2007; Lyon. USA: IEEE; p. 23-6, 2007.*
- YAMAGUTI, M. M., PAZ, A. P. L. Desenvolvimento de aparelho para eletroestimulação neuromuscular funcional. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, p. 51. 2009.
- YANG, Yea-Ru et al. Effects of neuromuscular electrical stimulation on gait performance in chronic stroke with inadequate ankle control-A randomized controlled trial. *PloS one*, v. 13, n. 12, p. e0208609, 2018.