

## CONTROLE FUZZY APLICADO EM UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EMBARCADO EM TRATORES PARA O ACIONAMENTO DE IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS

FABRÍCIO T. SOARES<sup>1</sup>, NELSON L. CAPPELLI<sup>2</sup>, ANGEL P. GARCIA<sup>3</sup>, CLÁUDIO K. UMEZU<sup>4</sup>, RAFAEL D. S. FAVALLE<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Tec<sup>o</sup> Mecânico, Mestrando, Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), UNICAMP, Campinas – SP, Fone: (19) 3521-1746, [ftsoares@outlook.com](mailto:ftsoares@outlook.com).

<sup>2</sup> Eng<sup>o</sup> Agrícola, Prof. Livre Docente, Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), UNICAMP, Campinas – SP.

<sup>3</sup> Eng<sup>o</sup> Agrícola, Prof. Dr., Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), UNICAMP, Campinas – SP.

<sup>4</sup> Eng<sup>o</sup> Eletricista, Pesquisador Dr., Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), UNICAMP, Campinas – SP.

<sup>5</sup> Graduando, Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), UNICAMP, Campinas – SP.

Apresentado no  
XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2015  
13 a 17 de setembro de 2015- São Pedro- SP, Brasil

**RESUMO:** A demanda da indústria agrícola por operações de maior complexidade impulsiona o desenvolvimento de alternativas para o acionamento destas máquinas, como a utilização de implementos elétricos. Visando o fornecimento de energia elétrica para o uso em implementos agrícolas, este trabalho propõe um sistema que utiliza a tomada de potência do trator para acionar um gerador síncrono, utilizando um controlador com lógica *fuzzy*, projetado para regular o nível de tensão gerada. Foram testadas e avaliadas, por simulações, diferentes arquiteturas de controle. Na primeira etapa avaliaram-se controladores *fuzzy* PI, PD e PID de múltiplas entradas e única saída e o erro da tensão gerada como variável de estado. Posteriormente avaliou-se um controlador *fuzzy* PI de única entrada e múltiplas saídas com uma base de regras modificada para o sistema. Na terceira etapa incluiu-se a velocidade angular de acionamento como variável de estado do controlador. O comportamento de cada arquitetura foi analisado por meio de índices de desempenho. Os resultados mostram a capacidade do sistema e o controlador *fuzzy* PI modificado em operar frente aos distúrbios aplicados, mantendo as variáveis de operação dentro dos limites estabelecidos.

**PALAVRAS-CHAVE:** gerador síncrono, controle *fuzzy*, implementos elétricos.

## FUZZY CONTROL APPLIED TO AN ELECTRICAL POWER GENERATION SYSTEM BOARDED ON TRACTORS FOR DRIVING AGRICULTURAL IMPLEMENTS

**ABSTRACT:** The demand of the agricultural industry by more complex operations motivates the development of alternative drives for these machines, such as the use of electrical implements. Aiming an electrical supply for use by agricultural implements, this paper proposes a system that uses the tractor power take-off to drive a synchronous generator, using a fuzzy logic controller designed to regulate the generated voltage level. Different control architectures were tested and evaluated by simulations. In the first stage were evaluated PI, PD and PID fuzzy controllers of multiple inputs and single output and the error of the generated voltage as state variable. Subsequently, it was evaluated a PI fuzzy controller of single input and multiple outputs with a modified rule base for the system. In the third step, the angular drive speed was included as state variable of the controller. The behavior of each architecture was analyzed by means of performance indicators. The results show the system

capability and the modified PI fuzzy controller to operate front of the applied disturbances, keeping the operation variables within the established limits.

**KEYWORDS:** synchronous generator, fuzzy control, electrical implements.

**INTRODUÇÃO:** A demanda da indústria agrícola por maior eficiência e controlabilidade das operações realizadas por tratores e implementos impulsionam o desenvolvimento de alternativas para o acionamento destas máquinas, como os sistemas elétricos (KARNER et al. 2012). Nos tratores convencionais tem-se como fontes de potência para os implementos a tomada de potência mecânica (TDP) e a tomada de potência hidráulica. Com a proposta de utilização de acionamentos elétricos, surge a necessidade de desenvolvimento de uma nova fonte de potência (PRANKL et al. 2011), a tomada de potência elétrica (TDPE). Ao contrário da TDP, uma TDPE pode eliminar a relação de dependência entre o controle de acionamento do implemento e a velocidade angular do motor diesel, tradicionalmente utilizado nos tratores agrícolas, possibilitando ainda, a utilização de sistemas de controle eletrônico, como em GARCIA (2014). Este trabalho apresenta um sistema de geração de energia elétrica embarcado e acionado pela TDP do trator. Um controlador em lógica *fuzzy* é projetado para a regulagem da tensão gerada. Para seu correto funcionamento o sistema deve ser capaz de operar frente a variações simultâneas da potência de carga e da velocidade angular do motor à combustão e manter a energia gerada dentro dos limites estabelecidos. O objetivo geral do trabalho é validar a viabilidade operacional do sistema proposto.

**MATERIAL E MÉTODOS:** O sistema proposto e seus principais componentes são mostrados na Figura 1, sendo: TDP, tomada de potência mecânica do trator;  $w$ , velocidade angular do rotor do GS; GS, gerador síncrono; PWM, modulação por largura de pulso;  $V_{fd}$ , tensão no circuito de campo do GS;  $V_{dc}$ , tensão no barramento DC do circuito inversor de frequência;  $P_o$ , potência de carga.

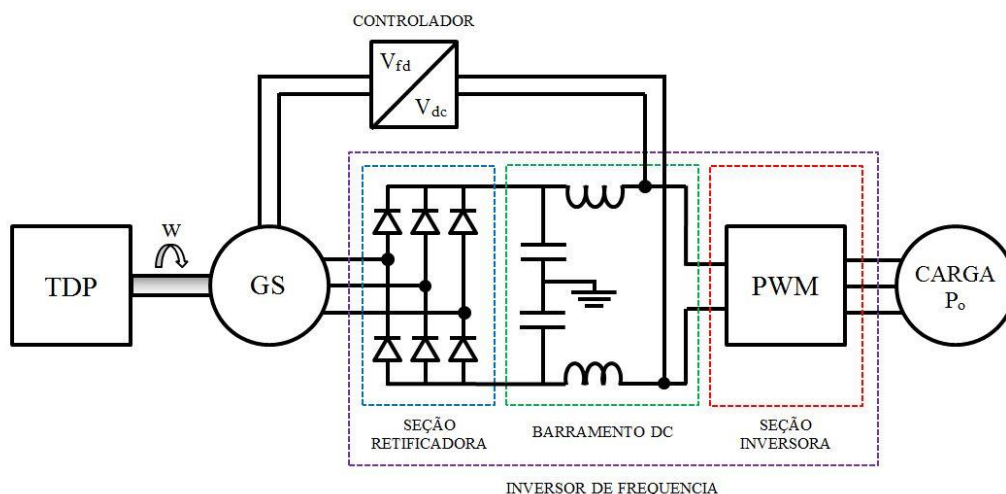


FIGURA 1. Diagrama de blocos da arquitetura do sistema de geração de energia elétrica.

A construção e parametrização do sistema proposto e o projeto e testes com o controlador *fuzzy* foram realizados por meio de simulações em Matlab e Simulink.

Com o trator em operação irão ocorrer mudanças na velocidade do eixo de transmissão, como consequência da demanda de potência e da troca de marchas. A mudança da velocidade angular de acionamento do GS causa variações na frequência e tensão geradas. Para o controle da frequência o sistema proposto se utiliza de um circuito inversor de frequência, enquanto a tensão é controlada por meio da atuação na tensão do circuito de campo do GS.

Na Tabela 1 são apresentados os valores nominais, máximos e mínimos atribuídos às variáveis de operação, baseadas em um modelo comercial de gerador síncrono de 20 kW.

TABELA 1. Variáveis de operação do sistema; valores nominais, máximos e mínimos.

Variáveis do sistema	Valores nominais	Valores máximos	Valores mínimos
$P_o$	20,0 kW (100%)	20,0 kW (100%)	0,0 kW (0%)
$w$	188,5 rad s <sup>-1</sup> (100%)	235,6 rad s <sup>-1</sup> (125%)	141,4 rad s <sup>-1</sup> (75%)
$V_{fd}$	135,0 Vcc (100%)	200,0 Vcc (148%)	N.A. <sup>1</sup>
$V_{dc}$	515,0 Vcc (100%)	566,5 Vcc (110%)	463,5 Vcc (90%)

(1) O valor mínimo de  $V_{fd}$  não é aplicável, por ser uma variável atuada do sistema.

$P_o$  e  $w$  são as variáveis independentes do sistema.  $V_{fd}$  é a variável atuada e  $V_{dc}$  a variável controlada, cujo comportamento determina a correta operação do sistema.

O processo de projeto e ajuste do controlador foi realizado em três etapas. Na primeira etapa foram testados os controladores *fuzzy* PI, PD e PID Simplificado, de múltiplas entradas e única saída (MISO) e o erro da tensão gerada como variável de estado, propostos por LI e GATLAND (1996). Na etapa dois, a arquitetura escolhida na etapa um foi adaptada para melhorar seu desempenho de atuação no sistema por meio de modificações nas bases de regras e variáveis do controlador *fuzzy*, passando a receber uma única entrada (SIMO). Na etapa três, o controlador foi novamente alterado para incluir  $w$  como variável de estado. Foram aplicados distúrbios que simulam a partida do sistema em estado zero até um patamar elevado de  $P_o$ , com  $w$  abaixo do valor nominal, seguido pelo alívio de  $P_o$  e aumento  $w$ , no instante de 2 s. Nesta sequencia, variações simultâneas de  $w$  e  $P_o$  simulam um cenário crítico para a operação do sistema. Os índices de desempenho avaliados foram: Integral do Erro Absoluto (IAE) e Integral do Erro Absoluto ponderada pelo Tempo (ITAE).

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** A Figura 2 ilustra os valores aquisitados de  $V_{dc}$  nas simulações do sistema com os controladores da primeira e segunda etapa de projeto. As curvas correspondentes aos controladores PID MISO aparecem sobrepostas. Na Tabela 2 estão os índices de desempenho dos controladores *fuzzy* da primeira e segunda etapa de projeto.

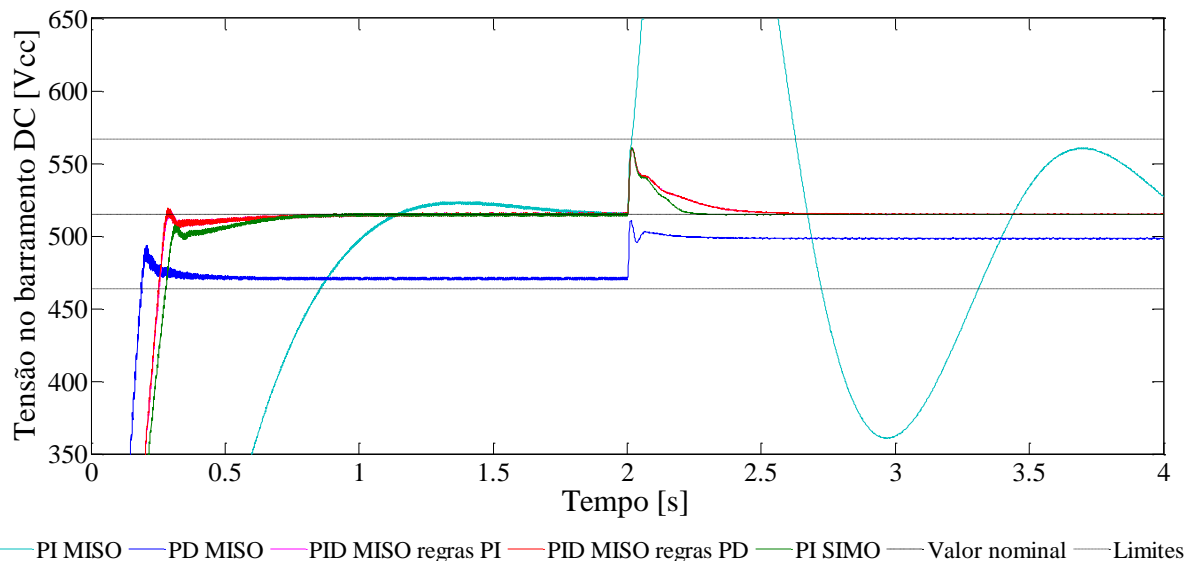


FIGURA 2. Valores aquisitados de  $V_{dc}$  nas simulações do sistema com os controladores da primeira e segunda etapa de projeto.

TABELA 2. Índices IAE e ITAE dos controladores da primeira e segunda etapa de projeto.

Controlador <i>fuzzy</i>	IAE	ITAE
PI MISO	1013,60	1479,20
PD MISO	332,06	368,82
PID MISO com regras PI	177,17	45,49
PID MISO com regras PD	176,76	45,42
PI SIMO	182,37	38,85

Inserindo  $w$  como variável de estado, foi possível modificar a atuação no controlador em função da velocidade angular de acionamento do gerador. O novo controlador *fuzzy* PI, com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), passa a receber o erro de  $w$ , calculado em torno da velocidade angular nominal de acionamento do rotor, de 188,5 rad s<sup>-1</sup> (1800 rpm). Na Tabela 3 estão os índices de desempenho dos controladores *fuzzy* PI SIMO e PI MIMO da terceira etapa de projeto. Para cada simulação, foram aplicados os mesmos distúrbios em  $P_o$  das primeiras etapas, enquanto  $w$  foi mantida constante, sendo: ( $w_1$ ),  $w$  à 235,6 rad s<sup>-1</sup>; ( $w_2$ ),  $w$  à 141,4 rad s<sup>-1</sup>.

TABELA 3. Índices IAE e ITAE dos controladores da terceira etapa de projeto.

Controlador <i>fuzzy</i>	IAE ( $w_1$ )	IAE ( $w_2$ )	ITAE ( $w_1$ )	ITAE ( $w_2$ )
PI SIMO	93,52	144,65	30,68	31,33
PI MIMO	93,16	144,01	30,69	31,20

A modificação da atuação em função de  $w$  impactou na estabilidade do sistema, causando oscilações na tensão do barramento DC. A solução encontrada foi reduzir a ação do erro de  $w$  sobre a resposta do controlador, o que explica os resultados semelhantes entre as duas arquiteturas de controle da terceira etapa de projeto. Os melhores resultados foram alcançados com o controlador *fuzzy* PI SIMO, que manteve o sistema operando nos limites estabelecidos, de forma estável, além de possuir apenas uma variável de estado.

**CONCLUSÃO:** Com a utilização de recursos em simulação de sistemas eletromecânicos, foi possível construir e parametrizar o modelo matemático de um sistema de geração de energia elétrica para o uso embarcado em tratores. As simulações demonstraram a capacidade do sistema associado ao controlador *fuzzy* em operar frente a distúrbios de carga e de velocidade de acionamento, mantendo as variáveis de operação dentro dos limites estabelecidos.

## REFERÊNCIAS

- GARCIA, A. P.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. **Electrically driven fertilizer applicator controlled by fuzzy logic**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 34, n. 3, p. 510-522, June 2014.
- KARNER, J.; PRANKL, H.; KOGLER, F. **Electric drives in agricultural machinery**. In: 3RD CIGR INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ENGINEERING, 2012, Valencia; Spain. Conference Paper. Kyoto, Japan: CIGR, 2012.
- LI, H. X.; GATLAND, H. B. **Conventional fuzzy control and its enhancement**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics, v. 26, n. 5, p. 791-797, 1996.
- PRANKL, H.; NADLINGER, M.; DEMMELMAYR, F.; SCHRÖDL, M.; COLLE, T.; KALTEIS, G. **Multi-functional pto generator for mobile electric power supply of agricultural machinery**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL ENGINEERING, 2011, Hannover; Germany. Conference Paper. Duesseldorf, Germany: VDI, 2011.