

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Análise de Controladores *Fuzzy* para Motor de Indução Aplicado na Modelagem e Simulação de Veículo Elétrico

Paulo Roberto Ubaldo Guazzelli¹

Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP,

Marcelo Suetake²

Departamento de Engenharia Elétrica, UFSCar, São Carlos, SP

Sérgio Henrique Evangelista³

Departamento de Engenharia Mecânica, UFSCar, São Carlos, SP

Osmar Ogashawara⁴

Departamento de Engenharia Elétrica, UFSCar, São Carlos, SP

Resumo. Um *drift buggy* elétrico tracionado por um motor de indução é modelado e simulado no Simulink, da MathWorks®, de modo que três controladores escalares *fuzzy* de velocidade são avaliados. Os resultados mostram que o controle *fuzzy* PD incremental modificado apresentou melhor resposta dinâmica do veículo.

Palavras-chave. Controle *fuzzy*, Modelagem, Motor de indução, Simulação, Veículo elétrico

1 Introdução

O aumento da preocupação com questões ambientais e com a qualidade de vida da população e a conseqüente normatização rigorosa de eficiência e emissão dos veículos proporcionou uma oportunidade para o estudo e projeto de veículos puramente elétricos (PEV - *Purely Electric Vehicles*) [3].

Diversos motores elétricos são usados em PEVs. Cada motor apresenta vantagens e desvantagens na sua utilização [4]. Este trabalho foca-se em estudar a utilização do Motor de Indução (MI) no processo de conversão de um veículo para propulsão elétrica, uma vez que ele equilibra boa confiabilidade com baixo custo [2].

Sendo o MI é um sistema não-linear, a investigação de técnicas de controle baseadas em sistemas *fuzzy* torna-se relevante, em virtude da sua capacidade de mapeamento de sistemas não-lineares e incertezas paramétricas. De acordo com [5], duas topologias se destacam: *Fuzzy* PD incremental (FPDInc), no qual a saída do sistema *fuzzy* é o incremento

¹paulo.ubaldo@usp.br

²suetake@ufscar.br

³toddyprof@ufscar.br

⁴osmaroga@ufscar.br

da variável de atuação, e o *Fuzzy* PD com Integrador (FPD+I), no qual o sistema *fuzzy* atua em paralelo com um ramo de integração, compondo a variável de atuação. Em [7], é usado um controle *Fuzzy* PD incremental com modificação no cálculo da variável de atuação (FPDIncMod), a partir do uso da frequência assíncrona do MI.

2 Propósitos

Este trabalho visa atuar no projeto de conversão elétrica de um *drift buggy*. Tem-se por objetivos neste trabalho modelar e simular o veículo elétrico, avaliando o uso de três controladores escalares *fuzzy* de velocidade: FPD+I, FPDInc e FPDIncMod, verificando a melhor alternativa para a aplicação.

3 Métodos

Um PEV pode ser dividido em três sistemas principais: elétrico, mecânico e de controle. Como fonte de energia elétrica do veículo, utilizou-se na simulação duas baterias de chumbo-ácido em série, constituindo um banco com 24 V, carga nominal de 90 Ah, e massa de 38 kg, usando-se o modelo de [8].

Dois conversores foram modelados para acionamento do MI: um conversor elevador da tensão contínua das baterias e um inversor de frequência. Quanto ao conversor elevador, desenvolveu-se um modelo simplificado para redução do esforço computacional durante a simulação, em que a tensão desejada na saída (V_{OUT}) é proporcional à tensão das baterias (V_{BAT}), por um fator α , ao mesmo tempo em que calcula a corrente drenada do banco de baterias (I_{BAT}) em função da corrente drenada pelo motor (I_{OUT}), por meio de (1), que considera o rendimento η_C do conversor.

$$I_{BAT} = \frac{V_{OUT} \cdot I_{OUT}}{V_{BAT} \cdot \eta_C} = \frac{\alpha \cdot I_{OUT}}{\eta_C} \quad (1)$$

O inversor foi modelado com uma ponte trifásica de IGBTs e diodos com componentes da biblioteca *SimPowerSystems*. Escolheu-se a modulação *Space Vector* por conseguir acionar o motor sem perda de tensão eficaz e também diminuir o número de comutações das chaves e a distorção harmônica [6]. O maior valor eficaz para tensões de linha senoidais sobre o MIT é calculado em função da tensão de saída do conversor elevador, como segue:

$$V_{RMS} = \frac{V_{OUT}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

Na simulação, o inversor deverá prover até 460 V_{RMS} . Assim, por meio de (2), chega-se a um ganho elevador de 27,01. Assumiu-se uma eficiência de 90% do conversor elevador, e definiu-se a frequência da modulação igual a 2 kHz.

Em relação aos subsistemas elétricos, o motor se comporta como uma carga, requisitando corrente do circuito elétrico. Em caso de frenagem regenerativa, ocorre o processo contrário. O motor passa a fornecer corrente para o sistema, aumentando o estado de carga da bateria. Utilizou-se o modelo do MI com referencial *dq* estacionário. O modelo fornece

o torque eletromagnético gerador pelo motor, usado para calcular o torque aplicado no eixo mecânico de entrada da transmissão, após cálculo das perdas mecânicas do motor. Para simulação do MI, utilizou-se um *preset model* do MATLAB® de 5 hp/460 V/60 Hz.

Acoplado ao motor, tem-se a transmissão, que otimiza a entrega de torque do eixo do motor (T_{in}) para as rodas (T_{out}), relacionando-os conforme (3), que considera o rendimento η_T do sistema,

$$\frac{T_{out}}{T_{in}} = \eta_T \cdot i = \eta_T \cdot \frac{\omega_{in}}{\omega_{out}} \quad (3)$$

e o fator i , derivado da relação entre as velocidades angulares dos eixos de entrada e saída, sendo constante no caso de uma transmissão fixa, como a utilizada no *drift buggy*. Esse fator é determinado como a razão entre o número de dentes das suas engrenagens (48/10). Assim, simulou-se uma redução com fator 4,8 e eficiência assumida de 90%.

A dinâmica veicular representa as forças opositoras ao movimento, podendo ser obtida a partir da 2ª lei de Newton, de acordo com [3], como segue:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_r}{\delta M} \quad (4)$$

em que a aceleração do veículo depende do somatório de forças que tracionam o veículo (F_t) e do somatório de forças resistentes ao movimento do veículo (F_r). Ainda, tem-se a massa M do veículo, e o fator adimensional δ , que aumenta a massa do veículo a fim de considerar as inércias rotativas da transmissão.

Primeiramente, devem-se explicitar as forças resistentes ao movimento, a saber, três: força aerodinâmica, de rolamento e gravitacional, constituindo três parcelas, como se vê em (5).

$$\sum F_r = \frac{1}{2} \rho C_D A_F \cdot V^2 + M g f_r \cdot \cos(\beta) + M g \cdot \sin(\beta) \quad (5)$$

A primeira parcela é a força aerodinâmica, que decorre do escoamento externo do ar em contato com o veículo em movimento, variando quadraticamente com a velocidade linear do carro, onde A_F é área frontal, C_D é o coeficiente aerodinâmico adimensional do veículo, e ρ é a densidade do ar.

A segunda parcela consiste na força de rolamento, advinda da deformação dos pneus em contato com a pista, dependendo do peso do veículo (que é função da massa e da aceleração da gravidade g) e do chamado coeficiente de rolamento (f_r). Ainda, o ângulo β de inclinação da pista influi em seu cálculo.

Finalmente, a última parcela refere-se à força gravitacional, que surge apenas quando o veículo percorre um trecho com variações de nível, sendo a projeção de seu peso sobre o eixo longitudinal. Em uma descida, essa força age a favor do movimento.

As forças de tração podem ser resumidas em uma força F_T que é obtida a partir do torque de saída da transmissão, em função do raio das rodas do veículo, como se vê em (6). Ainda, de acordo com [3], essa força é limitada a um valor máximo na aceleração (F_{MAX}) e na frenagem (F_{MIN}), em função também das dimensões da altura do Centro de Gravidade (CG) do veículo (h_G), da distância do CG ao eixo dianteiro (L_A) e do coeficiente de atrito da pista (μ), como se vê em (7).

$$\sum F_t = F_T = \frac{T_{OUT}}{R_D} |F_T \in [F_{MIN}, F_{MAX}] \tag{6}$$

$$-\frac{\mu M g \cos(\beta)[L_A - f_r(h_G - R_D)]}{L + \mu h_G} \leq F_T \leq \frac{\mu M g \cos(\beta)[L_A - f_r(h_G - R_D)]}{L - \mu h_G} \tag{7}$$

Ainda, pode-se calcular a máxima velocidade desenvolvida pelo carro, em km/h, por meio de (8), em função da velocidade angular nominal do motor (W_n), em rpm, assumindo que as forças resistentes não limitem o desempenho do motor.

$$V_{MAX} = 3,6 \cdot \frac{\pi \cdot R_D \cdot W_n}{30 \cdot i} \tag{8}$$

O *drift buggy* possui os parâmetros da Tabela 1. O coeficiente aerodinâmico e o de rolamento foram estimados conforme [3], enquanto que o coeficiente de atrito conforme [1]. A massa total foi estimada considerando a massa da estrutura, das baterias, do motor, dos componentes eletrônicos e do condutor.

Tabela 1: Parâmetros do *Drift-Buggy* Modelado

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Massa total (kg)	199,0	Área frontal (m^2)	0,65
Fator de inércia δ	1,1	Coefficiente aerodinâmico	0,70
Raio das rodas (m)	0,15	Entre-eixos (m)	1,10
Coefficiente de rolamento dos pneus	0,013	Altura do CG (m)	0,20
Coefficiente de atrito dos pneus com a pista	0,80	Distância do eixo dianteiro ao CG (m)	0,77

A estratégia de controle varia a amplitude e a frequência da tensão sobre o motor elétrico por meio do inversor de forma proporcional, para controle da velocidade (controle escalar V/f constante). A saída do controlador é a frequência do inversor (f , em Hz), que é transformada em tensão (V_{RMS} , em V) por um fator de conversão, como se vê em (9). Ainda, a frequência e a tensão de acionamento são limitadas entre 10 e 100% de seus valores nominais.

$$V_{RMS} = \frac{V_N}{f_N} \cdot f = \frac{460}{60} \cdot f = 7,67 \cdot f \tag{9}$$

Cada topologia de controle *fuzzy* calcula a variável frequência de um modo diferente. O controle FPDInc, mostrado na Figura 1 (a), calcula o incremento Δf que compõe a frequência de acionamento. O controle FPDncMod, visto na figura 1 (b), adiciona também uma parcela referente à velocidade mecânica (em rpm) convertida em frequência elétrica (Hz). Assim, o sistema *fuzzy* aplica uma correção na frequência de acionamento, limitada em ± 3 Hz. Por fim, o controle FPD+I possui um integrador limitado em paralelo com o sistema *fuzzy*, como se vê na Figura 1 (c), onde a saída combinada é convertida para o domínio da variável de atuação. Os domínios de cada variável dos controladores estão na Tabela 2.

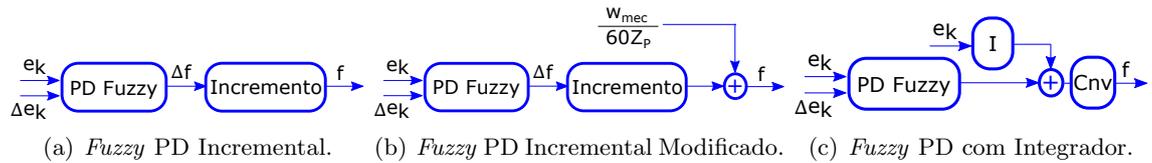
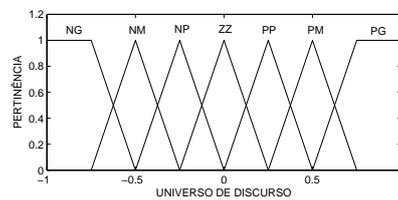


Figura 1: Estruturas dos Controladores *Fuzzy*.

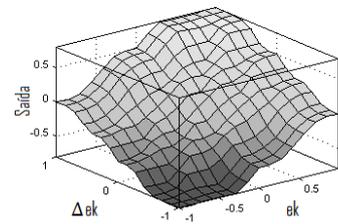
Tabela 2: Parâmetros dos Controladores *Fuzzy* Avaliados.

	FPDInc	FPDIncMod	FPD+I
Domínio de e_k (rpm)	[-500;500]	[-150;150]	[-5;5]
Domínio de Δe_k (rpm)	[-0,1;0,1]	[-0,07;0,07]	[-0,2;0,2]
Domínio da saída	[-0,01;0,01]	[-0,01;0,01]	[-1;1]
Domínio da frequência (Hz)	[6;60]		
Ganho de integração	—	—	0,0011

Os sistemas de Mamdani possuem funções de pertinência das entradas e da saída iguais e simétricas, conforme mostrado na Figura 2, o que reduz esforço computacional [7]. Assim, as variáveis de entrada foram normalizadas em função dos seus domínios originais para o intervalo [-1;1], bem como a variável de saída desnormalizada de [-1;1] para o seu domínio original. Têm-se os seguintes termos: {(Negativo Grande), (Negativo Médio), (Negativo Pequeno), (Zero), (Positivo Pequeno), (Positivo Médio), (Positivo Grande)}.



(a) Termos Linguísticos.



(b) Superfície de Regras.

Figura 2: Parâmetros dos Sistemas *Fuzzy* PD.

O modelo completo do *drift buggy* está na Figura 3. As baterias são conectadas ao conversor elevador, cuja saída alimenta o inversor trifásico, que aplica a tensão trifásica desejada no MI de acordo com o determinado pelo controlador *fuzzy*. O MI é acoplado à transmissão, que é ligada à dinâmica veicular.

Pela Equação (8), o veículo pode desenvolver até 21 km/h. Assim, ele foi simulado com referências de 10, 20 e 15 km/h durante um segundo cada. Sendo assim, a simulação durou três segundos no total, ocorrendo em pista plana ($\beta = 0 \text{ rad}$). Utilizou-se um passo fixo de simulação ($2 \cdot 10^{-5} \text{ s}$) e o método de integração *ode3*, do MATLAB[®]. Como a referência dos controles é a velocidade angular do motor (REF), esta foi obtida a partir da velocidade linear desejada para o veículo, por meio do raio das rodas e do fator de redução. A partir da Tabela 1, chegou-se às referências para o motor de 849, 1698 e 1273 rpm.

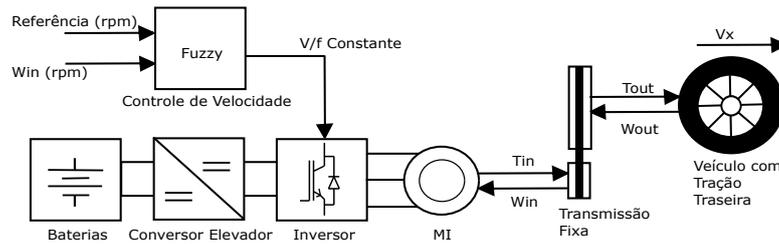
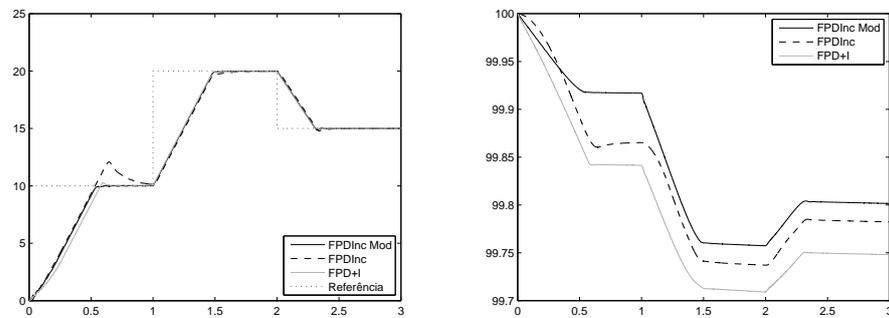


Figura 3: Diagrama de Simulação do PEV.

4 Resultados e Discussões

A velocidade linear do veículo ao longo do tempo pode ser vista na Figura 4 (a), para os três controladores simulados. Vê-se que em alta velocidade (20 km/h) e durante a



(a) Velocidade Linear do Veículo.

(b) Estado de Carga do Banco de Baterias.

Figura 4: Resultados Obtidos nas Simulações com Três Controladores *Fuzzy*.

frenagem os três controles obtiveram desempenhos semelhantes. No entanto, na velocidade de 10 km/h, percebe-se que o controle FPDInc apresentou fenômeno de *windup*, e que o controle FPD+I desenvolveu menor aceleração. Assim, o controle FPDIncMod foi menos suscetível ao *windup*, apresentando melhor desempenho dinâmico entre as três topologias.

Na Figura 4 (b), tem-se o gráfico do estado de carga das baterias ao longo do tempo. A análise dos três perfis de estado de carga, vistos na Figura 4 (b), mostra que o consumo do veículo com controle FPDIncMod foi menor do que com os outros dois controladores. Na última parte da simulação os três sistemas regeneraram energia para o banco de baterias, aumentando seu estado de carga, ao reduzir a velocidade do MI, caracterizando a frenagem regenerativa.

Outro ponto a ser ressaltado é o fato de o controle FPD+I utilizar um ganho de integração, cujo ajuste requer conhecimento da planta, aumentando a dependência do seu modelo, contrariando o propósito do sistema *fuzzy* de reduzi-la. Frente aos resultados, o sistema com controle FPDIncMod apresentou o resultado mais satisfatório, conciliando resposta dinâmica e consumo de energia.

5 Conclusões

Em ambiente computacional, simulou-se um veículo elétrico movido por MI, de modo que o motor foi controlado por três topologias de sistemas *fuzzy*. O controle *fuzzy* PD incremental modificado mostrou-se melhor em relação ao desempenho mecânico do veículo e ao consumo de energia, frente as outras topologias simuladas, bem como na redução da dependência do modelo do sistema. Nas próximas etapas, destaca-se a caracterização de um MI real, para inserção dos dados na simulação, aproximando-a da prática. Para trabalhos futuros, cita-se implementar em bancada os controles de velocidade por meio de processador digital, simulando-se o perfil de torque de carga do veículo via computador, para obtenção de resultados práticos, e o desenvolvimento de controle de corrente do MI.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro por meio de chamada pública MCTI/CNPq/SPM-PR/Petrobras nº 18/2013.

Referências

- [1] A. C. Canale, Automobilística: dinâmica e desempenho, Érica, (1989).
- [2] D. Casadei, M. Mengoni, G. Serra, A. Tani and L. Zarri, A control scheme with energy saving and dc-link overvoltage rejection for induction motor drives of electric vehicles, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, 1436-1446, (2010), DOI: 10.1109/TIA.2010.2049627.
- [3] M. Ehsani, Y. Gao and A. Emadi, Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design, CRC Press, (2010).
- [4] N. Hashemnia and B. Asaei, Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles, 2008 18th International Conference on Electrical Machines, (2008).
- [5] J. Jantzen, Foundations of Fuzzy Control, John Wiley and Sons, (2007).
- [6] H. Pinheiro, F. Botteron, C. Rech, L. Schuch, R. F. Camargo, H. L. Hey, H. A. Gründling e J. R. Pinheiro, Modulação space vector para inversores alimentados em tensão: uma abordagem unificada, Sba: Controle e Automação Sociedade Brasileira de Automática, vol. 16, 13-24, (2005).
- [7] M. Suetake, I. N. da Silva and A. Goedtel. Embedded DSP-based compact fuzzy system and its application for induction motor V/f speed control, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, 750-760, (2011), DOI: 10.1109/TIE.2010.2047822.
- [8] O. Tremblay and L. A. Dessaint, Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications, World Electric Vehicle Journal, vol. 3, 1-10, (2009).