

JAIC

Journal of Applied Instrumentation and Control

Aplicação da Lógica Fuzzy no Gerenciamento de Sistemas de Armazenamento de Energia

Fernanda C. Corrêa, Ludmila C. de Alckmin e Silva, Jony Javorski Eckert, Franco Giuseppe Dedini.

Resumo — Os veículos automotores têm uma grande contribuição na quantidade de poluentes presentes no ar, desta forma, o interesse na utilização de veículos elétricos vem ganhando espaço cada vez mais no sentido de substituir os veículos convencionais em um futuro próximo. Veículos elétricos são aqueles no qual o sistema propulsor é dado por um motor elétrico alimentado por um sistema de armazenamento de energia, que pode ser formado por um conjunto de baterias apenas, ou por um conjunto de baterias conectados à supercapacitores. A utilização de supercapacitores juntamente com o conjunto de baterias tem como propósito armazenar os picos de energia provenientes das frenagens, realizando o condicionamento dessa energia para que esta possa ser armazenada no conjunto de baterias ou utilizada pelo motor elétrico. Neste trabalho será utilizado um modelo de veículo elétrico com dois motores elétricos, cada um acoplado às rodas dianteiras, onde será desenvolvido o gerenciamento de energia entre o conjunto de baterias e supercapacitores visando o aumento da autonomia da bateria sem causar prejuízo ao desempenho veicular. Para o desenvolvimento do sistema de gerenciamento será utilizada a lógica fuzzy, cujos resultados serão comparados à estratégia baseada em regras, o que possibilita análise comparativa da melhoria da autonomia do veículo.

Palavras-chave — veículos elétricos, supercapacitores, baterias, fuzzy, gerenciamento.

I. INTRODUÇÃO

Os veículos movidos com algum tipo de combustível fóssil foram prevaletentes por várias décadas. No entanto, preocupações ambientais têm estimulado tecnologias mais sustentáveis relacionadas à mobilidade, no qual os veículos elétricos (VE) estão sendo como uma solução promissora [1]. Em particular, os veículos elétricos são mais vantajosos em relação aos demais, devido ao fato de não ter nenhum consumo de combustível, pouco ruído e reduzido custo de utilização

[2],[3]. A cada ano que se passa, as companhias automobilísticas estão se esforçando para mostrar diversos modelos de VEs com melhor desempenho e uma melhor autonomia da bateria, possibilitando um trajeto maior. Em um ambiente urbano com frequentes paradas e acelerações causa muitas operações de carga e descarga associados à altos picos de correntes que podem danificar a bateria, reduzindo assim sua vida útil [4]-[6]. Uma alternativa para minimizar os picos de corrente são sistemas híbridos de armazenamento de energia (SHAE) [7],[8]. Os SHAE usualmente combinam dois ou mais dispositivos para armazenar energia, tais como bateria e células à combustível ou baterias e supercapacitores (SC) [9], [10]. O objetivo principal desses dispositivos é minimizar os esforços sofridos pela bateria, estender sua vida útil e ainda reduzir seu tamanho e custo [7]. Ao contrário das baterias que tem alta energia específica e baixa potência específica, os SC tem alta potência específica e baixa energia específica. Desta forma, os SC são capazes de atingir picos de energia por curtos períodos, o que pode ser útil em partidas de VEs e também aumentar a capacidade do SHAE de recuperar a frenagem de energia por regeneração usando o motor elétrico [7], [8]. Essas características do SC, associadas a uma bateria, tornam-se a associação de dispositivos recomendável para aplicações em veículos [8], [11].

Entretanto, o uso de um SHAE aumenta a complexidade do VE, que necessita de uma estratégia de gerenciamento confiável para controlar as características do sistema [12]. Em um SHAE, as estratégias de gerenciamento de energia dividem, da melhor forma, a potência requerida entre os dois componentes de armazenamento [13].

Muitos estudos foram feitos em relação às estratégias de gerenciamento do SHAE. Em [12] os autores propõem vários métodos de gerenciamento com diferentes algoritmos dependentes do modo de operação. Em trabalhos recentes, para obter maior eficiência de trabalho do SHAE, várias estratégias de gerenciamento de energia são dedicadas à otimização global dos parâmetros de desempenho do sistema. Mas, as funções objetivas se diferem nestes trabalhos, como dimensionamento

F. C. Corrêa, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Ponta Grossa, Paraná, Brasil, fernandacorrea@utfpr.edu.br.

L. C. A. Silva, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo, Brasil, ludmila@fem.unicamp.br.

J. J. Eckert, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo, Brasil, javorski@fem.unicamp.br.

F.G. Dedini, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo, Brasil, dedini@fem.unicamp.br.

ótimo do SHAE, minimização de perdas e maior ciclo de vida da bateria [13].

Neste trabalho, o EV estudado é baseado na configuração que mostra a melhor configuração relacionada à vida útil da bateria conforme apresentado em [14]. Neste caso, o EV é propulsionado por dois motores elétricos (ME) conectados diretamente às rodas dianteiras e por um motor elétrico acoplado ao diferencial que aciona as rodas traseiras como proposto por [15]. O sistema de gerenciamento de energia (SGE) do veículo é responsável pela divisão da demanda de energia entre os sistemas de acionamento disponíveis, além de definir a fonte que irá satisfazer a energia solicitada pelo motor elétrico.

O SHAE utilizado é composto por um banco de bateria associada a um banco de supercapacitor como mostrado na Figura 1.

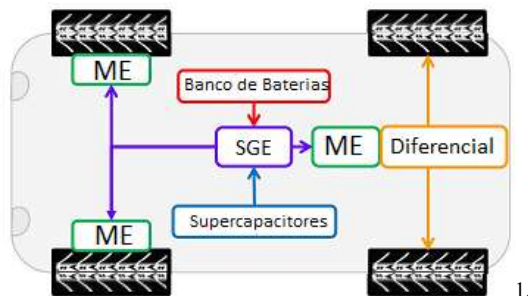


Figura 1. Esquemático de VE com motores nas rodas

Para se realizar o controle de potência entre os dois componentes do sistema de armazenamento de energia (bateria e supercapacitores), é necessário realizar o condicionamento dos sinais de potência, desta forma, utiliza-se conversores CC-CCs (Corrente Contínua para Corrente Contínua).

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é realizar o gerenciamento do SHAE, de acordo com as características de potência requerida do sistema, com o intuito de aumentar a autonomia da bateria durante o ciclo de condução. O sistema de gerenciamento do SHAE utilizará a lógica fuzzy, de forma que este sistema consiga tomar a melhor decisão sobre qual fonte de energia usar para armazenar uma determinada quantidade de energia ou para fornecer a energia para o motor elétrico.

O trabalho está dividido em seção II que explora a definição da lógica fuzzy que será utilizada neste trabalho. A seção III contempla o desenvolvimento do sistema de gerenciamento de energia. A seção IV apresenta os resultados e as respectivas discussões provenientes da análise destes, e por fim a seção V aborda as conclusões obtidas durante a realização deste trabalho.

II. LÓGICA FUZZY

Krithika et al. [16] e Pan et al. [17] evidenciam em seus estudos que os controladores fuzzy correspondem ao estado da arte para sistemas veiculares complexos, devido a sua capacidade de atuar com múltiplas entradas e saídas de controle

[18] as quais são definidas de acordo com o estado dinâmico do veículo [19].

A lógica fuzzy é a lógica baseada na teoria dos conjuntos fuzzy, na qual distingue-se dos sistemas lógicos convencionais em seus atributos e particularidades. Neste raciocínio, a lógica exata corresponde a um caso limite da lógica aproximada, sendo entendido como um processo de formação de relações vagas [20]. Na lógica fuzzy, o valor verdade de uma proposição pode ser um subconjunto fuzzy de qualquer conjunto parcialmente ordenado, ao contrário dos sistemas lógicos binários, onde o valor verdade só pode assumir dois valores: verdadeiro (1) ou falso (0).

Nos sistemas lógicos multi-valores, o valor verdade de uma proposição pode ser ou um elemento de um conjunto finito, num intervalo, ou uma álgebra booleana. Na lógica nebulosa, os valores verdade são expressos linguisticamente, (e.g.: verdade, muito verdade, não verdade, falso, muito falso, ...), onde cada termo linguístico é interpretado como um subconjunto fuzzy do intervalo unitário [21].

Outras características da lógica fuzzy podem ser sumarizadas como segue: nos sistemas lógicos binários, os predicados são exatos (e.g.: par, maior que), ao passo que na lógica fuzzy os predicados são nebulosos (e.g.: alto, baixo, ...). Nos sistemas lógicos clássicos, o modificador mais utilizado é a negação enquanto que na lógica fuzzy uma variedade de modificadores de predicados são possíveis (e.g.: muito, mais ou menos, ...). Estes modificadores são essenciais na geração de termos linguísticos (e.g.: muito alto, mais ou menos perto, etc) [20].

Na teoria de conjuntos clássica, um elemento pertence ou não a um dado conjunto. Dado um universo U e um elemento particular $x \in U$, o grau de pertinência $\mu_A(x)$ com respeito a um conjunto $A \subseteq U$ é dado por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \tag{1}$$

A função $\mu_A(x): U \rightarrow \{0,1\}$ é chamada de função característica na teoria clássica de conjuntos. Frequentemente, uma generalização desta ideia é utilizada, por exemplo, para manipulação de dados com erros limitados. Todos os números dentro de um erro percentual terão um fator de pertinência 1, tendo todos os demais um fator de pertinência 0 (veja Figura 2a). Para o caso preciso, o fator de pertinência é 1 somente no número exato, sendo 0 para todos os demais (veja Figura 2b).

Zadeh [22] propôs uma caracterização mais ampla, na medida em que sugere que alguns elementos são mais membros de um conjunto do que outros. O fator de pertinência pode então assumir qualquer valor entre 0 e 1, sendo que o valor 0 indica uma completa exclusão e um valor 1 representa completa pertinência. Esta generalização aumenta o poder de expressão da função característica. Por exemplo, para expressar a ideia de que uma temperatura tem seu valor por volta de 25, pode-se utilizar uma função de pertinência triangular (veja Figura 2c), com o pico em 25, para sugerir a ideia de que quanto mais perto o número de 25, mais ele se identifica com o conceito representado.

Formalmente, seja U uma coleção de objetos denominados

genericamente por $\{u\}$. U é chamado de universo de discurso, podendo ser contínuo ou discreto. Um conjunto fuzzy A em um universo de discurso U é definido por uma função de pertinência μ_A que assume valores em um intervalo $[0,1]$. O conjunto suporte de um conjunto fuzzy A é o sub-conjunto dos pontos u de U tal que $\mu_A(u) > 0$. Um conjunto fuzzy cujo conjunto suporte é um único ponto de U com $\mu_A = 1$ é chamado de um conjunto unitário fuzzy [21].

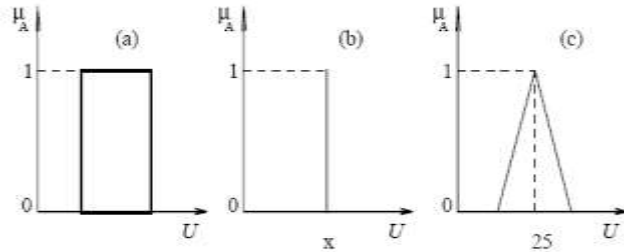


Figura 2 - Funções de Pertinência

Sejam A e B subconjuntos nebulosos em U , com funções de pertinência μ_A e μ_B . A interseção fuzzy de A e B é, por definição, o conjunto fuzzy C .

$$C = A \cap B \tag{2}$$

$$C = \sum_{\mu \in U} \mu_c(u)u \tag{3}$$

$$\mu_c(u) = \min \{ \mu_A(u), \mu_B(u) \} \tag{4}$$

A implicação é uma declaração da forma: Se A Então B ; ou de forma condensada $A \rightarrow B$ (A implica B). Se A e B forem conjuntos fuzzy, então $A \rightarrow B$ será uma declaração condicional fuzzy. Através do emprego de frases da forma Se (condições) Então (conclusões / ações), chamadas de regras de produção, é possível traduzir de maneira linguística um conhecimento. Existem diversas formas de se representar uma implicação fuzzy [23], as duas maneiras mais usuais de fazê-lo é através de uma conjunção fuzzy, usando mínimo () ou produto algébrico (•).

$$A \rightarrow B \quad \Delta A \times B \quad \Delta \int_{U \times V} \mu_A(u) \wedge \mu_B(v) / (u, v) \tag{5}$$

$$A \rightarrow B \quad \Delta A \times B \quad \Delta \int_{U \times V} \mu_A(u) \bullet \mu_B(v) / (u, v) \tag{6}$$

Cada uma das regras *Se... Então* carrega uma informação sobre o sistema. O conjunto de todas elas, ou seja, o conjunto união de todas as regras exprime o conhecimento ou o modelo do sistema. Cada uma das regras pode ser traduzida por uma implicação fuzzy R_i e a união de todas elas forma um conjunto fuzzy no qual está condensado todo o conhecimento que se tem sobre o sistema:

$$R = \bigcup_i \tag{7}$$

O comportamento do sistema será o resultado da união das ações individuais de cada regra que o descreve. O conjunto fuzzy R é, pois, o equivalente ao modelo ou função de transferência do sistema empregado na teoria de controle.

A regra composicional de inferência proposta por Zadeh [24] é capaz de inferir uma saída aproximada B' , quando o antecedente da regra A se casa de maneira aproximada com o fato A' , e exatamente, o consequente B previsto pela regra quando $X = A$. É, neste sentido, que a regra composicional de inferência desempenha uma MODUS PONENS GENERALIZADO (M.P.G.), base do raciocínio aproximado. Seu enunciado é: Seja R uma relação nebulosa de U para V , e X' um subconjunto de U [20]. Então o subconjunto nebuloso Y' de V , induzido por X' em R é dado por:

$$Y' = X' \cdot R \tag{8}$$

$$\mu_{y'}(v) = \max_u \{ \min \{ \mu_{x'}(u), \mu_R(u, v) \} \} \tag{9}$$

$$\mu_R(u, v) = \mu_{A \rightarrow B}(u, v) = (\mu_x(u) * \mu_y(v)) \tag{10}$$

III. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DO SHAE

Nesta seção é abordado o desenvolvimento do sistema de gerenciamento de energia do SHAE utilizando-se os conversores CC-CC buck e boost para o condicionamento do sinal que será gerenciado, e a lógica fuzzy utilizada para realizar o gerenciamento entre os dois componentes armazenadores.

A. Conversores CC-CC

Há dois conversores dentro desta categoria que são amplamente empregados e que são utilizados neste trabalho. O primeiro trata-se de um conversor Boost que possui como característica a elevação de tensão. Dessa forma, o conversor Boost é utilizado na bateria, a mesma atua como fonte de tensão da entrada, sendo assim, exige-se uma elevação de tensão na saída, drenando corrente da mesma e conseqüentemente descarregando-a.

O segundo conversor utilizado foi um Buck-Boost, o mesmo possui característica diferente do primeiro, uma vez que pode ser utilizado tanto com abaixador como elevador de tensão, o que define tal comportamento é o valor da razão cíclica da frequência de chaveamento do mesmo.

O conversor Buck-Boost é utilizado para controlar o fluxo de energia no supercapacitor, pois devido às características do mesmo atuando como elevador de tensão descarrega o componente em questão, e atuando como abaixador, fornece energia carregando-o, uma vez que a entrada do conversor é o próprio supercapacitor. A Figura 3 apresenta o diagrama de blocos implementado no Simulink.

B. Lógica Fuzzy

Como já mencionado anteriormente, o objetivo deste trabalho é otimizar o consumo de bateria através da utilização

do SHAE. O sistema de gerenciamento então foi desenvolvido contendo três variáveis de entrada e duas de saída. As entradas são: Potência Requerida, Derivada da Potência Requerida e Tensão do Supercapacitor. A primeira variável de entrada refere-se à potência solicitada do SHAE, enquanto a segunda variável de entrada é utilizada para prever o comportamento da potência solicitada, sendo que isto é feito utilizando-se a sua respectiva derivada, podendo analisar a tendência do comportamento da curva de potência, e a última variável de entrada é utilizada com objetivo de controlar a tensão do supercapacitor para que, dessa forma, não a sature e seja possível otimizar a utilização do mesmo. Já, as variáveis de saída são as potências requeridas do supercapacitor e do banco de baterias. Através de tais valores é possível controlar o chaveamento dos conversores atuando no fluxo de energia e acionamento entre tais componentes do SHAE. A Figura 4 apresenta tais variáveis linguísticas.

A potência requerida foi classificada em sete funções de pertinência de forma a obter um controle mais preciso dentro do espectro da potência, são elas: PSB (Potência Super Baixa), PB (Potência Baixa), PPB (Potência Pouco Baixa), PM (Potência Média), PPA (Potência Pouco Alta) e PSA (Potência Super Alta). A Figura 5 apresenta as funções de pertinência descritas acima.

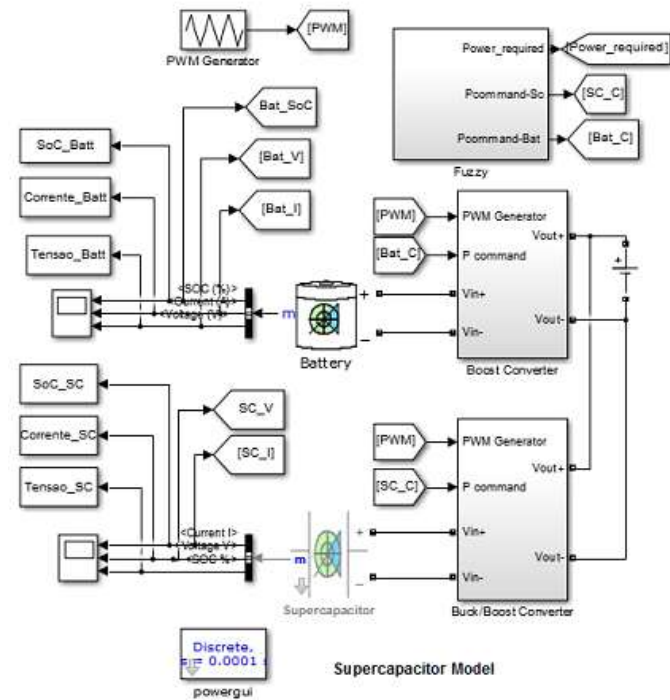


Figura 3. Diagrama de Blocos implementados em simulink

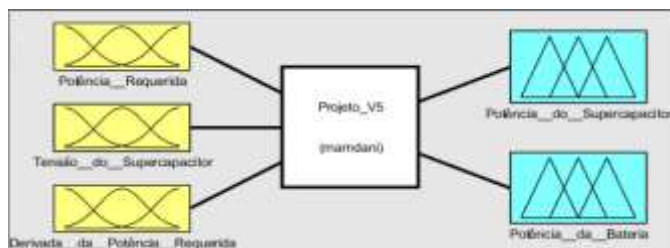


Figura 4. Variáveis de entrada e saída do controlador fuzzy

A derivada da potência requerida foi implementada em três

funções de pertinência, com intuito de analisar o comportamento da potência requerida e otimizar a precisão do controlador. São elas: N (Negativo), Z (Zero) e P (Positivo). A Figura 6 apresenta as funções de pertinências descritas acima.

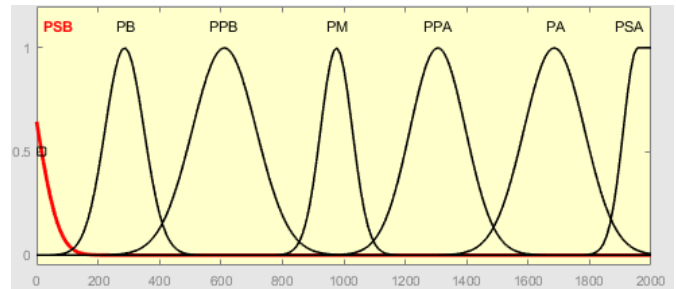


Figura 5. Potência requerida

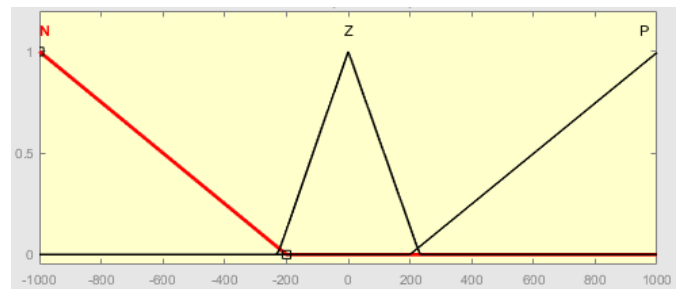


Figura 6. Derivada da Potência Requerida

A terceira variável linguística utilizada, a tensão do supercapacitor foi dividida em três funções de pertinência, Baixo, Médio e Alto. Sendo assim, é possível determinar com maior precisão quando é mais conveniente o supercapacitor ser utilizado como fonte de energia ou quando o mesmo pode ser carregado. Ambos casos são utilizados visando o aumento da autonomia do banco de baterias. A Figura 7 apresenta tais funções de pertinência para respectiva variável linguística.

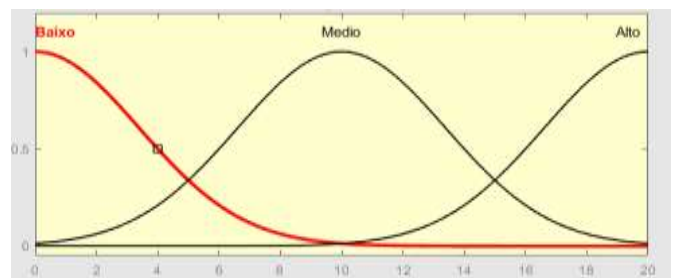


Figura 7. Tensão no supercapacitor

A variável linguística para potência do supercapacitor foi classificada em nove funções de pertinência, são elas: NG (Negativo Grande), Negativo Pequeno (NP), PSB (Potência Super Baixa), PB (Potência Baixa), PPB (Potência Pouco Baixa), PM (Potência Média), PPA (Potência Pouco Alta) e PSA (Potência Super Alta). Esta variável linguística apresenta um maior número de funções de pertinência, pois admite valores negativos de potência, sendo possível, dessa forma, controlar o conversor Buck-Boost de modo a carregar e descarregar o mesmo. A Figura 8 apresenta as funções de pertinência descritas acima.

Para a variável linguística da potência do banco de baterias,

foram definidas sete funções de pertinência, são elas: PSB (Potência Super Baixa), PB (Potência Baixa), PPB (Potência Pouco Baixa), PM (Potência Média), PPA (Potência Pouco Alta) e PSA (Potência Super Alta).

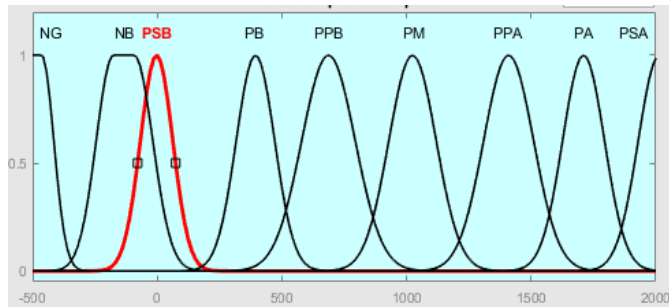


Figura 8. Potência do supercapacitor

Para o banco de baterias não há funções de pertinência representando uma faixa com valores negativos devido a mesma não ser recarregável, dessa forma, o conversor Boost é controlado para gerenciar o fluxo de energia do banco de bateria. Este é um parâmetro muito importante, pois é através do mesmo que o controlador Fuzzy atua de modo a otimizar a curva do estado de carga do banco de bateria. A Figura 9 apresenta as funções de pertinência citadas.

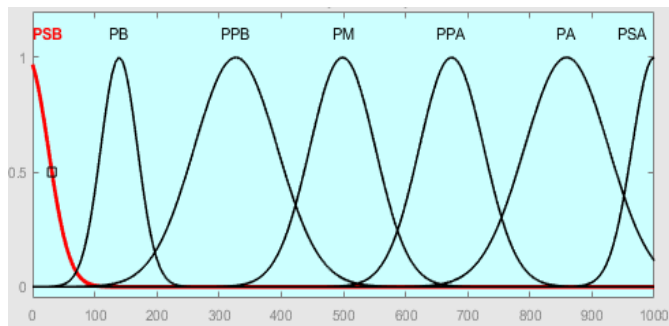


Figura 9. Funções de Pertinência da Potência da bateria.

Optou-se pelas curvas gaussianas em grande parte das funções de pertinência implementadas devido a necessidade de uma transição suave, evitando assim picos de potência transmitidos aos conversores, tornando assim a atuação suave. Definiu-se sessenta e três regras no controlador Fuzzy de modo a relacionar todas as variáveis linguísticas de entrada com intuito de atuar em todos os casos possíveis previstos em projeto. Os Quadros I e II apresentam a lógica implementada via conjunto de regras, que sempre leva em consideração a potência requerida e a tensão do supercapacitor para então saber qual fonte de energia será utilizada.

O diagrama de blocos do sistema implementado em Simulink é apresentado na Figura 10. Por meio das Figuras 11 e 12 é possível visualizar a superfície formada pela lógica utilizada na implementação do controlador fuzzy. Na Figura 11 tem-se a superfície formada para gerar a potência da bateria e a do supercapacitor utilizando-se a potência requerida e sua respectiva derivada. Enquanto a Figura 12 ilustra a superfície formada para gerar a potência da bateria e a do supercapacitor utilizando-se a potência requerida e a tensão do supercapacitor.

QUADRO I

Lógica de acionamento das regras fuzzy para o cálculo da potência da bateria

P_comando BATT	V_SC	Potência Requerida						
		PSB	PPB	PB	PM	PPA	PA	PSA
Derivada Potência Requerida	N Baixo	PPB	PPB	PM	PSA	PM	PB	PSB
	N Médio	PPB	PPB	PM	PSA	PM	PB	PSB
	N Alto	PPB	PPB	PM	PSA	PM	PB	PSB
	Z Baixo	PSB	PPB	PB	PSA	PM	PB	PPB
	Z Médio	PSB	PPB	PB	PSA	PM	PB	PPB
	Z Alto	PSB	PPB	PB	PSA	PM	PB	PPB
P	P Baixo	PSB	PPA	PA	PSA	PA	PB	PPB
	P Médio	PSB	PPA	PA	PSA	PA	PB	PPB
	P Alto	PSB	PPA	PA	PSA	PA	PB	PPB

QUADRO II

Lógica de acionamento das regras fuzzy para o cálculo da potência do supercapacitor

P_comando SC	V_SC	Potência Requerida						
		PSB	PPB	PB	PM	PPA	PA	PSA
Derivada Potência Requerida	N Baixo	NG	NP	NP	PSB	PB	PPA	PSA
	N Médio	NG	NP	NP	PSB	PB	PPA	PSA
	N Alto	NG	NP	NP	PSB	PB	PPA	PSA
	Z Baixo	NP	PPB	PSB	PSB	PSB	PPA	PA
	Z Médio	NP	PPB	PSB	PSB	PSB	PPA	PA
	Z Alto	NP	PPB	PSB	PSB	PSB	PPA	PA
P	P Baixo	NP	PPB	PSB	PSB	PSB	PPA	PA
	P Médio	NP	PPB	PSB	PSB	PSB	PPA	PA
	P Alto	NP	PPB	PSB	PSB	PSB	PPA	PA

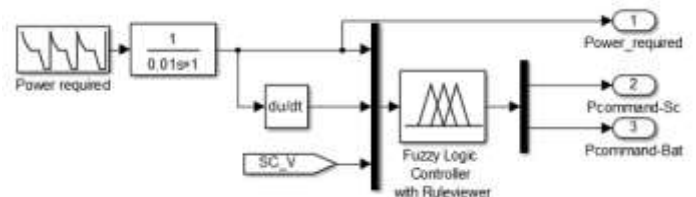


Figura 10. Diagrama de blocos do sistema fuzzy implementado

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após do desenvolvimento do controlador Fuzzy definiu-se os parâmetros de simulação a ser utilizados. Estabeleceu-se um tempo de simulação de 50 segundos para que os resultados obtidos pudessem ser melhor analisados. Foram utilizados 50 segundos para viabilizar o processamento e assim obter resultados introdutórios. Inicialmente foram obtidos os parâmetros originais do sistema sem controlador, posteriormente o controle desenvolvido foi testado e as formas de onda obtidas. Neste trabalho avaliou-se o estado de carga da bateria, e a potência fornecida pelas fontes. Sendo assim, as curvas do estado de carga da bateria obtidas com e sem controle Fuzzy são apresentadas na Figura 13. É possível notar que o banco de baterias sem controlador apresentava um estado de carga final próximo de 95,5%, após a verificação do desempenho do sistema com controle Fuzzy observou-se o estado de carga final próximo a 96,3%, ou seja, uma otimização de aproximadamente 1% do estado de carga da bateria para um tempo de simulação ainda pequeno.

A Figura 14 apresenta a potência entregue pelo banco de baterias e supercapacitor. Nota-se a utilização das fontes de acordo com o previsto nas regras do controlador Fuzzy, onde em desacelerações é requisitado maior utilização do

supercapacitor e em acelerações e velocidade constante, o banco de baterias.

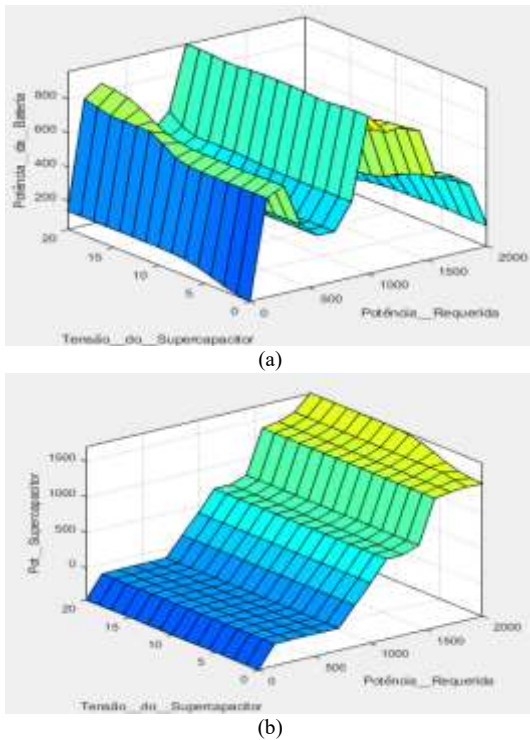


Figura 11. Gráfico de superfície do acionamento da potência da bateria (a) e da potência do supercapacitor (b) em relação à potência requerida e a tensão do supercapacitor

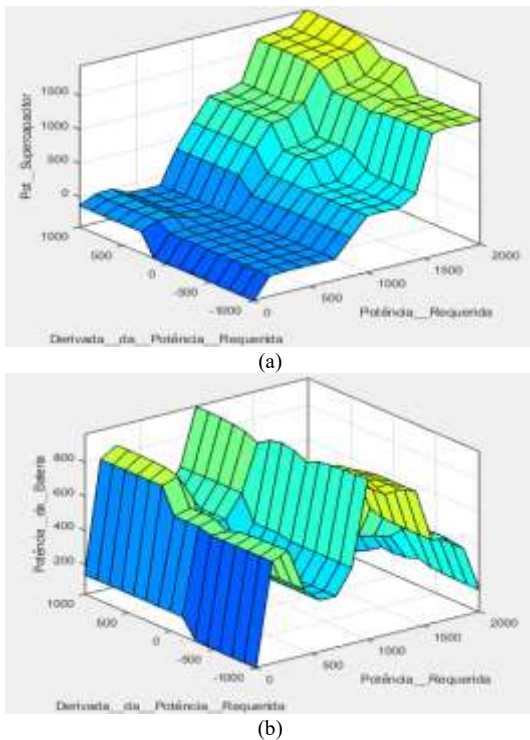


Figura 12. Gráfico de superfície do acionamento da potência da bateria (a) e da potência do supercapacitor (b) em relação à potência requerida e sua derivada

A Figura 15 apresenta a relação entre a potência requerida e a potência fornecida pelas duas fontes, ou seja, supercapacitor e bateria. É possível notar que a potência fornecida pelas fontes

supre a demanda. Devido a utilização de conversores CC-CC, há ondulação de corrente na saída dos mesmos, isso influencia diretamente na curva de potência gerada, uma vez que tal aspecto interfere no processo de acionamento do supercapacitor e do banco de baterias, como pode ser visto na Figura 14, justificando assim a ondulação observada no gráfico da Figura 15.

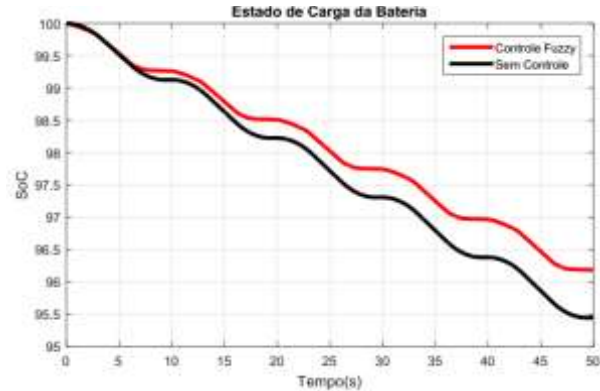


Figura 13. Comparação do estado da carga da bateria com e sem gerenciamento fuzzy

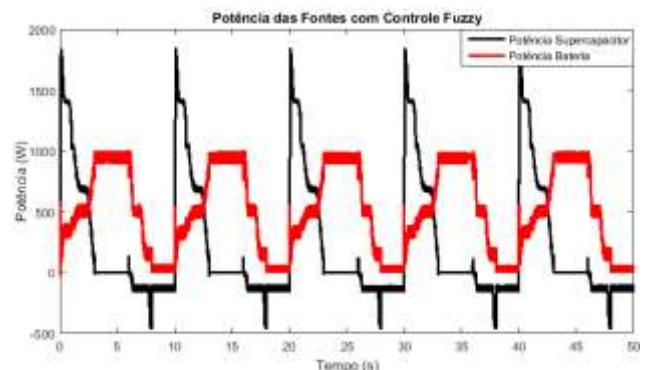


Figura 14. Potências das Fontes Com Controlador Fuzzy.

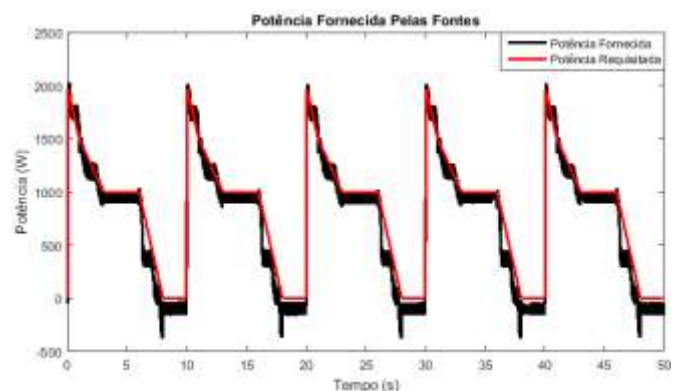


Figura 15. Potência de Entrada e Saída.

IV. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto o desenvolvimento de um controlador Fuzzy para controle de conversores CC-CC visando a otimização do estado de carga do banco de baterias utilizando um supercapacitor. Os conversores Boost e Buck-Boost foram implementados utilizando a biblioteca Simscape do Simulink,

os mesmos atuam no controle do banco de baterias e no supercapacitor, respectivamente. O Controle Fuzzy desenvolvido possui três variáveis linguísticas de entrada e duas de saída utilizando 63 regras, sendo possível, dessa forma, realizar um controle mais preciso de todas as situações previstas. Após as simulações, os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que mostram que o estado de carga do banco de baterias foi otimizado como desejava-se, aumentando a autonomia do banco de baterias. Sendo assim, o controlador Fuzzy mostra-se uma excelente alternativa para ser implementado em aplicações de sistemas de armazenamento de energia com supercapacitor e banco de baterias. Posteriormente variáveis de entrada podem ser adicionadas no controlador Fuzzy, otimizando a atuação do mesmo baseado em uma gama maior de informações do sistema. Além disso, várias outras técnicas de controle e também de otimização podem estar sendo utilizadas para que a divisão da potência entre as fontes ocorra de forma a otimizar a eficiência energética do veículo

REFERÊNCIAS

- [1] L. C. A. Silva, F. C. Correa, G. Gioria, e F. G. Dedini, "Desdobramento funcional aplicado em um veículo elétrico", apresentado em Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2014.
- [2] S. F. Tie e C. W. Tan, "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, p. 82–102, abr. 2013.
- [3] P. G. Pereirinha and J. P. Trovão, "Multiple energy sources hybridization: The future of electric vehicles?" in, *New Generation of Electric Vehicles*. Rijeka, Croatia: InTech, 2012.
- [4] B. Wang, J. Xu, B. Cao, and X. Zhou, "A novel multimode hybrid energy storage system and its energy management strategy for electric vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 281, pp. 432–443, 2015.
- [5] J. Hu, X. Jiang, M. Jia, and Y. Zheng, "Energy management strategy for the hybrid energy storage system of pure electric vehicle considering traffic information," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 8, p. 1266, 2018.
- [6] Z. Song, H. Hofmann, J. Li, J. Hou, X. Han, and M. Ouyang, "Energy management strategies comparison for electric vehicles with hybrid energy storage system," *Applied Energy*, vol. 134, pp. 321–331, 2014.
- [7] J. J. Eckert, L. C. d. A. Silva, F. G. Dedini, and F. C. Correa, "Electric vehicle powertrain and fuzzy control multi-objective optimization, considering dual hybrid energy storage systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 4, pp. 3773–3782, 2020.
- [8] J. J. Eckert, L. Correa de Alkmin e Silva, F. Mazzariol Santiciolli, E. dos Santos Costa, F. C. Correa, and F. Giuseppe Dedini, "Energy storage and control optimization for an electric vehicle," *International Journal of Energy Research*, vol. 42, no. 11, pp. 3506–3523, 2018.
- [9] M. Hannan, M. Hoque, A. Mohamed, and A. Ayob, "Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 771–789, 2017.
- [10] M. C. Joshi, S. Samanta, and G. Srungavarapu, "Frequency sharing based control of battery/ultracapacitor hybrid energy system in the presence of delay," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 11, pp. 10571–10584, Nov. 2019.
- [11] I. Husain, *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals*. CRC press, 2011.
- [12] M. Kamali-Nejad, T. Azib, G. Remy, O. Bethoux, e C. Marchand, "Optimization of a power electronic structure for hybrid Fuel Cell/Ultracapacitors vehicle", apresentado em 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille, France, set. 2010.
- [13] Xu Liangfei, Hua Jianfeng, Li Xiangjun, Li Jianqiu and Ouyang Minggao, "Distributed control system based on CAN bus for fuel cell/battery hybrid vehicle", 2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2009..
- [14] F. C. Correa, J. J. Eckert, L. C. A. Silva, F. M. Santiciolli, E. S. Costa, e F. G. Dedini, "Study of Different Electric Vehicle Propulsion System Configurations", in 2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Montreal, QC, Canada, out. 2015, p. 1–6.
- [15] L. C. A. Silva, J. J. Eckert, F. M. Santiciolli, E. S. Costa, F. G. Dedini, e F. C. Correa, "A study of battery power for a different electric vehicle propulsion system", in 2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS), Aachen, Germany, mar. 2015, p. 1–6.
- [16] Krithika, V., & Subramani, C. (2018). A comprehensive review on choice of hybrid vehicles and power converters, control strategies for hybrid electric vehicles. *International Journal of Energy Research*, 42(5), 1789-1812.
- [17] Pan, C., Gu, X., Chen, L., Yi, F., & Zhou, J. (2020). Fuzzy optimal energy management for battery electric vehicles concerning equivalent speed. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, e12527.
- [18] Eckert, J. J., Santiciolli, F. M., Yamashita, R. Y., Corrêa, F. C., Silva, L. C., & Dedini, F. G. (2019). Fuzzy gear shifting control optimisation to improve vehicle performance, fuel consumption and engine emissions. *IET Control Theory & Applications*, 13(16), 2658-2669.
- [19] Yang, J., Na, J., Guo, Y., & Wu, X. (2015). Adaptive estimation of road gradient and vehicle parameters for vehicular systems. *IET Control Theory & Applications*, 9(6), 935-943.
- [20] Gomide, Fernando, Ricardo R. Gudwin, and Ricardo Tanscheit. "Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações." *Proc. 6 th IFSA Congress-Tutorials*. Vol. 59. 1995.
- [21] Lee, Chuen-Chien. "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. I." *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics* 20.2 (1990): 404-418.
- [22] Zadeh, Lotfi A. "Fuzzy sets." *Information and control* 8.3 (1965): 338-353.
- [23] C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. I", *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 20, no 2, p. 404–418, abr. 1990.
- [24] Zhang, Ke, et al. "A Multitasking Genetic Algorithm for Mamdani Fuzzy System with Fully Overlapping Triangle Membership Functions." *International Journal of Fuzzy Systems* (2020): 1-17.

Received: 04 August 2020

Accepted: 25 September 2020

Published: 20 October 2020



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Application of Fuzzy Logic in Energy Storage Systems Management

Abstract— Conventional vehicles have a great contribution in the number of pollutants present in the air, thus, the interest in the use of electric vehicles has been gaining space more and more in the sense of replacing conventional vehicles in the near future. Electric vehicles are those in which the propulsion system is provided by an electric motor powered by an energy storage system, which can be formed by a set of batteries only, or by a set of batteries connected to the supercapacitors. The use of supercapacitors together with the battery pack has the purpose of storing the energy peaks from the braking, making the conditioning of this energy so that it can be stored in the battery pack or used by the electric motor. In this work, an electric vehicle model with two electric motors will be used, each coupled to the front wheels, where energy management between the set of batteries and supercapacitors will be developed, aiming at increasing the battery's autonomy without causing damage to vehicle performance. For the development of the management system, fuzzy logic will be used, whose results will be compared to the strategy based on rules, which allows a comparative analysis of the improvement of the vehicle's autonomy.

Key words — electric vehicles, supercapacitors, batteries, fuzzy, management.