

Aplicação de Lógica Fuzzy no Controle do Consumo de Energia em Veículos Elétricos

Luiz da Rocha Farias, Anderson Luiz Fernandes Perez e Patricia Bordignon André

Resumo—Este trabalho descreve o projeto e o desenvolvimento de um sistema de controle para um veículo elétrico. O tema “Veículos Elétricos” voltou a tona nos últimos anos devido a necessidade de se construir veículos menos poluentes e, apesar das pesquisas nesta área terem avançado bastante, existem alguns pontos que devem ser melhorados e um deles é o rendimento energético do veículo. De modo a aumentar a eficiência energética de um veículo elétrico foi desenvolvido um sistema de controle utilizando Lógica Fuzzy que foi avaliado em diferentes situações de superfície (plano, declive e aclone). Por fim, os resultados obtidos com o sistema de controle demonstraram que o mesmo foi capaz de manter a estabilidade da velocidade, conseqüentemente diminuindo o consumo da corrente e da potência consumida pelo veículo elétrico, mesmo em ambientes imprecisos.

Palavras Chaves—veículos elétricos, eficiência energética, lógica fuzzy, sistema de controle.

I. INTRODUÇÃO

Os combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás representam 80% da energia total produzida mundialmente. O restante desse percentual é dividido entre as energias renováveis (solar, eólica e geotérmica), energia hidroelétrica e energia nuclear [1]. Mediante a este fato e por pressões de ambientalistas os países industrializados estão propondo novas medidas para a redução do uso de combustíveis não renováveis, por conseqüência gerando uma diminuição de poluentes lançados no meio ambiente [2].

O transporte terrestre vem contribuindo significativamente para a deterioração do meio ambiente, contribuindo para o aumento do efeito estufa causada pela emissão de gases como monóxido de carbono, dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e dióxido de carbono [2].

Devido o crescimento vertiginoso da frota de veículos automotores nas últimas décadas e suas respectivas contribuições para a degradação do meio ambiente por meio da emissão de poluentes, políticas de contenção de emissão desses gases foram necessárias para reduzir a poluição atmosférica. No Brasil, por exemplo, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) criada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) visa por meio de resoluções propor, diretrizes, prazos e padrões regulamentando níveis admissíveis de poluentes emitidos por veículos automotores nacionais e importados [3].

A partir das exigências impostas pelo PROCONVE a indústria automobilística desenvolveu um novo sistema de mistura de ar-combustível para diminuir a emissão de poluentes, a injeção eletrônica. O sistema de injeção eletrônica tem a função de dosar a quantidade de combustível conforme a operação do motor. Os principais benefícios são menor consumo de combustível, aceleração sem atraso e baixo teor de poluentes.

Outras medidas foram tomadas, por exemplo, a imposta pelo Estado da Califórnia, Estados Unidos da América (EUA) onde a CARB (*California Air Resources Board*) previa que 2% da frota de carros deveriam ter características de emissão zero (ZEV - *Zero Emission Vehicles*) a partir de 1998, sendo que em 2003 esta porcentagem passaria para 10% [4] [2]. Esta foi a medida mais radical, em resposta a proposta da CARB as montadoras voltaram a investir no Veículo Elétrico (VE) [5].

Um VE é composto por uma bateria que fornece energia para o motor elétrico acionando as rodas, e um controlador que regula o fluxo de energia para o motor [5]. Atualmente o VE é a solução mais próxima do conceito zero emissão (ZE). Por ZE entende-se zero ruído, zero emissões de poluentes e zero emissões de gases do efeito estufa, onde é possível minimizar o aumento de temperatura dos últimos anos [6].

Para o VE se tornar realidade para a maioria das pessoas, a maior parte dos investimentos devem ir para a produção e distribuição de energia elétrica, suprimindo a demanda de eletricidade. De acordo com [7], para mover uma frota de aproximadamente 1 bilhão de veículos elétricos seria necessário uma produção mundial de energia de 5 mil terawatts-horas, que requer um aumento de 30% na produção atual.

De acordo com o exposto acima torna-se necessário fazer com que os VEs sejam mais eficientes do ponto de vista do consumo de energia. Face a esta afirmação neste trabalho é proposto um sistema de controle baseado em Lógica Fuzzy (LF) para aumentar a eficiência energética de um VE em um ambiente plano, de aclone e de declive.

Este artigo esta organizado como segue: a Seção II detalha a trajetória dos veículos elétricos; a Seção III descreve como funciona o raciocínio fuzzy; na Seção VI é descrito em detalhes a arquitetura de controle proposta; a Seção VII descreve os resultados obtidos com sistema de controle proposto; as considerações finais estão na Seção VIII.

Novembro 12, 2015

II. VEÍCULOS ELÉTRICOS

Em 1859 o belga Gaston Planté realizou a demonstração da primeira bateria de chumbo e ácido. Esse equipamento veio a ser utilizado por diversos veículos elétricos desenvolvidos a partir do início da década de 1880 na França, EUA e Reino Unido. Em 1901, Thomas Edison, interessado no potencial dos veículos elétricos, desenvolveu a bateria níquel-ferro, com capacidade de armazenamento 40% maior que a bateria de chumbo, só que com custo de produção muito mais elevado. As baterias níquel-zinco e zinco-ar foram também criadas no final do século XIX [8].

Além das baterias, duas tecnologias desenvolvidas entre 1890 e 1900 influenciaram para melhorar o desempenho dos veículos elétricos: a frenagem regenerativa, um dispositivo capaz de transformar a energia cinética do automóvel em energia elétrica durante uma frenagem e o sistema híbrido a gasolina e eletricidade. Na virada do século XIX, três tecnologias de propulsão concorriam no mercado de automóveis: o carro elétrico, a vapor e a gasolina [9].

De acordo com [10], os requisitos necessários para que a bateria esteja propícia a ser utilizada em veículos elétricos são:

- Estar preparada para trabalhar no frio ou no calor;
- Necessitar de pouca manutenção;
- Universalidade (substituição por outro modelo/fabricante);
- Segurança.

Embora os VEs possuíssem melhor eficiência que os veículos com motores de combustão interna, sofriam com a baixa autonomia das baterias, a dificuldade para recarrega-las, devido a falta de estrutura, o tempo de recarga que era inviável para viagens de longas distâncias e os preços das baterias que elevavam seu custo [11]. De acordo com [12], quatro motivos são considerados importantes para o desaparecimento dos VEs no início de 1900.

- (1) Muitas cidades na década de 1920 foram interligadas, alavancando a necessidade de veículos com maior autonomia;
- (2) As descobertas de reservas de petróleo no Texas diminuíram o preço da gasolina e aumentaram a infraestrutura de distribuição;
- (3) A invenção da partida elétrica em 1912 para veículos com motores de combustão interna, substituindo a incômoda partida a manivela;
- (4) O sistema de produção em série, proposto por Henry Ford, que permitiu que o veículo a gasolina chegasse ao consumidor final entre 500,00 a 1.000,00 dólares, a metade do preço dos veículos elétricos da época.

O ressurgimento dos VEs ocorreu no início da década de 1990 quando a *California Air Resources Board* (CARB) determinou que 2% da frota dos veículos do estado da califórnia deveriam ser elétricos em 1998, 5% em 2001 e 10% em 2003. O fabricante que não cumprisse os requisitos impostos pela CARB, iria ser multado em US\$ 5.000 para cada veículo aquém da cota estabelecida [13].

O VE é atualmente a solução mais próxima do conceito zero emissão (ZE). A principal dificuldade para a evolução dos VEs é o armazenamento da carga elétrica em baterias. Por causa do seu custo elevado e por também ser poluente para o meio ambiente ao término da sua vida útil, torna-se uma dificuldade para a evolução dos VEs.

Avanços estão sendo realizados neste segmento automobilístico, como pode ser observado na Figura 1, o carro elétrico i3 da BMW. Outras montadoras como General Motors(GM), Ford, Nissan, Renault entre outras, também vem investindo proporcionando estudos e pesquisas para o desenvolvimento dos VEs.



Figura 1. Carro Elétrico i3 da BMW.

Extraído de: [14]

Pensando no futuro das grandes cidades, a FIA (*Fédération Internationale de l'Automobile*) criou a Fórmula-e (Fórmula de Carros Elétricos), que iniciou em Setembro de 2014 e até Junho de 2015 percorreu cidades importantes como Londres, Pequim e Miami. Na primeira temporada a competição contou com a participação de dez equipes, cada uma com dois pilotos.

Esta iniciativa representa uma visão para o futuro da indústria automobilística, servindo como ambiente de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), aumentando o interesse geral para os VEs e fomentando a sustentabilidade [15]. Na Figura 2 é ilustrado um veículo elétrico utilizado na Formula-e.



Figura 2. Veículo Elétrico Utilizado na Formula-e.

Extraído de: [15]

III. RACIOCÍNIO FUZZY

A Lógica Fuzzy (LF) é uma teoria matemática, onde seu principal objetivo é simular o raciocínio humano através das tomadas de decisões em ambientes de incerteza, subjetividade e imprecisão [16]. Com a LF é possível lidar com informações do tipo, “muito”, “pouco”, “pequeno”, “alto”, “bom”, “quente”, “frio” etc, concedendo um retorno aproximado para questões baseadas em conhecimentos inexatos, incompletos ou não totalmente confiáveis [17].

A LF é composta por 3 (três) operações básicas, Fuzzificação, Inferência e Defuzzificação. Segundo [18], o processo de fuzzificação mapeia os valores de entrada, gerando os conjuntos fuzzy de entrada para o processo de inferência. No processo de inferência ocorre a invocação da regra com maior pertinência para uma determinada ação e por fim no processo de defuzzificação é convertido o valor inferido em um valor preciso para o sistema de controle. A Figura 3 ilustra esse processo.



Figura 3. Operações básicas da Lógica Fuzzy.

Extraído e Adaptado de: [19]

Por exemplo, considerando um sistema para um veículo que de acordo com a superfície que se encontra deve alterar a velocidade para “mais rápido” ou “mais devagar” para que consiga se movimentar adequadamente em qualquer tipo de ambiente. Neste caso, a superfície pode ser definida em “plano”, “declive” e “active” e a velocidade em “devagar”, “normal” e “rápido”.

Segundo [20], no processo de fuzzificação as variáveis de entrada devem ser mapeadas de acordo com seus conjuntos de funções para então converter um valor de entrada intermediário em um valor fuzzy. Após ocorrer a fuzzificação das variáveis de entrada o sistema está pronto para fazer a tomada de decisão baseado nas regras estabelecidas. Considerando o exemplo do carro descrito acima, uma regra poderia ser:

SE superfície **É** active
ENTÃO velocidade de saída **É** rápido

Neste caso, o sistema percebe que a superfície é um active e então determina mais potência para o motor girar com mais força e compensar o grau de inclinação da superfície. Esta regra pode ser considerada simples, podendo ser facilmente implementada sem utilizar LF, mas salienta-se que a escolha é baseada em um conjunto de regras de acordo com o grau de pertinência.

No processo conhecido como defuzzificação o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras Fuzzy será convertido para um valor discreto, determinando o valor da variável de saída [21] [16].

IV. FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

Um conjunto fuzzy possui funções de pertinência que determinam o quanto um elemento pertence a este conjunto [22]. A função representada pela Equação 1, calcula o quanto o elemento Ax pertence ao conjunto A . $\mu_A(x)$ é o grau de pertinência do elemento x ao conjunto A , podendo assumir um valor entre zero e um. Quanto mais próximo o valor de $\mu_A(x)$ for de um, significa que este elemento pertence ao conjunto A , e quanto mais próximo de zero este valor for, menor será sua pertinência ao conjunto A [17].

$$\mu_A : x \longrightarrow [0, 1] \tag{1}$$

As funções de pertinência podem ser representadas graficamente assumindo diversas formas, tais como:

- Função Triangular;
- Função Trapezoidal;
- Função Gaussiana;
- Função Sino;
- Função Sigmoide;
- Função Senoidal.

As funções mais utilizadas são as de forma triangular e as de forma trapezoidal, cuja representação gráfica é ilustrada na Figura 4. O eixo Y do gráfico representa o grau de pertinência e o eixo X representa o universo de discurso.

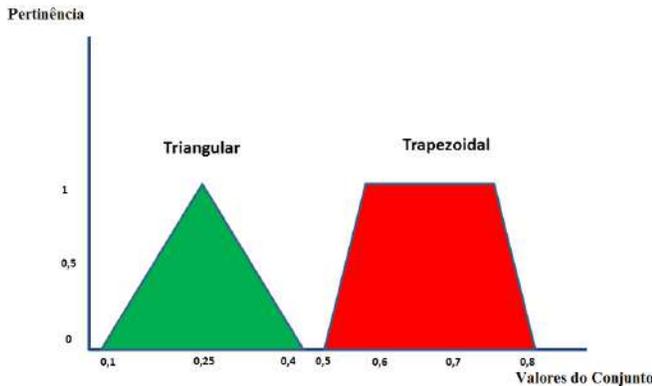


Figura 4. Função Triangular e Função Trapezoidal.

A função de pertinência triangular possui três valores escalares (a,b,c) que indicam apenas um ponto máximo de valores, conforme Equação 2.

$$f(x : a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \tag{2}$$

A função de pertinência trapezoidal possui quatro valores (a,b,c,d), onde é possível representar todo um intervalo de pontos de máximo [23]. A Equação 3 representa a função de pertinência trapezoidal [24].

$$f(x : a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \leq c \\ 0, & x > d \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d \end{cases} \tag{3}$$

Para chegar ao valor real da variável de saída, após o processo de fuzzificação é necessário utilizar um método de defuzzificação. Existem alguns métodos de defuzzificação, na Seção V é descrito em detalhes os métodos de defuzzificação conhecido como Centróide (Centro da Massa) e Média dos Máximos.

V. MÉTODOS DE DEFUZZIFICAÇÃO

Os resultados de todas as regras inferidas são defuzzificados para valores reais por meio de um método de defuzzificação [18]. Existem vários métodos que podem ser utilizados na teoria, este trabalho abordará os dois mais utilizados, descrito em detalhes na Seção V-A e na Seção V-B.

A. Centróide

O método de defuzzificação Centróide, também conhecido como método do centro de gravidade, é responsável por calcular o centróide da área que representa o conjunto de saída fuzzy [16].

A Equação 4 representa como é definido o centro de gravidade [25].

$$C = \frac{\sum P_A(x)x}{\sum P_A(x)} \tag{4}$$

Analisando a Equação 4 é possível verificar que o resultado da variável determinada nesse processo é obtida pelo somatório de cada área multiplicado pelo respectivo centro de gravidade e dividido pelo somatório das áreas.

B. Média dos Máximos

O método de defuzzificação Média dos Máximos busca retornar o ponto que possui maior grau de pertinência, porém no conjunto pode existir mais de um ponto com grau de pertinência máxima. Para não escolher um ponto aleatório é feito uma média entre os valores encontrados [26]. Este resultado é calculado pela Equação 5.

$$u = \frac{\sum_{m=1}^M u_m}{M} \tag{5}$$

onde, u_m representa os pontos de pertinência máximo inferido e M é a quantidade de valores inferidos no processo de inferência.

Os métodos apresentados são utilizados em diversos tipos de sistemas de controle fuzzy. Na Seção V-C são apresentados dois tipos mais utilizados.

C. Sistemas de Controle Fuzzy

Um sistema de controle fuzzy é um modelo que contém conjuntos fuzzy para representar o significado de cada variável de controle, processa as variáveis de entrada e saída usando um conjunto de regras para transformar os valores dos conjuntos fuzzy em uma variável de saída com um valor real [27].

Segundo [28], existem dois tipos de raciocínio fuzzy, o primeiro é com base em regras de inferência, o segundo dispensa a definição de funções de implicação e operadores para a inferência.

De acordo com [29], os sistema de controle fuzzy (SCF) do tipo Mamdani pertencem ao primeiro exemplo descrito nesta Seção, já o SCF desenvolvido por Takagi e Sugeno pertencem ao segundo grupo. Em ambos os sistemas a ação é definida de acordo com uma base de regras contidas e acionadas no processo de inferência do SCF. Uma regra (Ri) pode ser representada como:

Antecedente: x é A' e y é B'
 Regra (Ri): se x é A_i e y é B_i então z é C_i

Consequente: $z \in C'_i$

Os SCF do tipo Mamdani transfere o valor da função de pertinência para o conjunto de saída e obtém como resultado uma área que representa os valores inferidos no processo de inferência e então utiliza os conjuntos fuzzy de saída e um método de defuzzificação (citados na Seção V) para processar o valor real de saída.

Na década de 80 foi proposta uma estrutura também baseada na teoria dos conjuntos fuzzy [28]. Segundo [30] os SCF do tipo Takagi-Sugeno processam os dados fuzzy de entrada e de acordo com as regras de inferência geram o grau de pertinência de cada valor de entrada nos conjuntos fuzzy de saída.

Como no modelo Mamdani, o modelo Takagi-Sugeno utiliza uma base de regras de inferência, mas nesse modelo os consequentes das regras não são formados pelas relações fuzzy, e sim, pela composição de equações que relacionam as entradas e saídas [31]. A Equação 6 ilustra uma regra comum do modelo Takagi-Sugeno.

$$\text{se } x_1 = A_i \text{ e } x_2 = A_j \text{ e } \dots \text{ e } x_p = A_m \text{ .} \therefore y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_p) \quad (6)$$

onde, φ significa a média ponderada dos valores gerados no processo de inferência das regras.

Portanto, pode-se concluir que a principal diferença entre os dois SCF mais utilizados é que no Modelo Mamdani, tanto o antecedente quando o consequente são expressos por termos linguísticos, já no modelo Takagi-Sugeno somente o antecedente é representado por termos linguísticos e o consequente por termos funcionais.

Nesse trabalho foi utilizado o modelo Mamdani para desenvolver o sistema de controle fuzzy proposto. A principal razão de escolha deve-se ao fato deste ser muito mais intuitivo que o modelo do tipo Takagi-Sugeno. Este sistema é descrito em detalhes na Seção VI-B do próximo Capítulo.

VI. CARACTERÍSTICAS DA ARQUITETURA PROPOSTA

A arquitetura de controle ideal para o veículo elétrico proposta neste trabalho está ilustrada na Figura 5. Esta arquitetura é composta por um microcontrolador, sistema de telemetria, sistema de aceleração e frenagem, sistema de regeneração de energia, painel solar e alguns sensores.

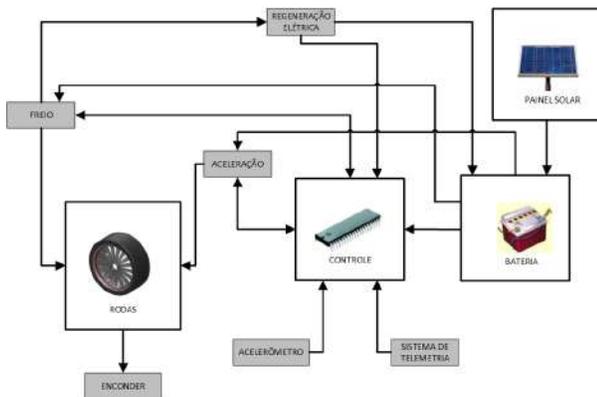


Figura 5. Arquitetura de Controle Proposta.

As baterias são utilizadas para prover energia para o microcontrolador bem como para o motor do VE. O sistema de regeneração elétrica gerencia a frenagem regenerativa, ou seja, a energia cinética gerada pela frenagem é transformada em energia elétrica, esta energia pode ser utilizada na recarga das baterias do VE. A arquitetura de controle também possui um sistema de recarga de bateria baseado em um painel solar.

O sistema de telemetria, cuja interface gráfica está ilustrada na Figura 6, foi implementado na linguagem de programação JAVA.

Com o sistema de telemetria é possível salvar os dados do sistema de controle em um arquivo de log, para então ser analisados. Os dados que podem ser enviados do VE para o sistema de telemetria são corrente consumida, estado da bateria e velocidade em PWM (*Pulse Width Modulation*). Os resultados obtidos nos experimentos realizados são descritos no Capítulo VII.



Figura 6. Interface do Sistema de Telemetria.

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de controle Fuzzy (SCF) utilizando a biblioteca eFLL, desenvolvida pelo *Robotic Research Group* (RRG) da Universidade Estadual do Piauí (UESPI-Teresina) [32]. O objetivo do SCF é aumentar a eficiência energética do VE, como se fosse a injeção eletrônica utilizada nos veículos com motores de combustão interna. Segundo [33], o sistema de injeção eletrônica tem a função de dosar a quantidade de combustível em função da operação do motor. O SCF tem como objetivo controlar a potência do motor elétrico, neste caso, a corrente enviada ao motor em relação à inclinação do VE e a carga da bateria disponível. Este sistema é descrito em detalhes na Seção VI-B.

A. Veículo Elétrico Desenvolvido

A estrutura mecânica do VE desenvolvido é uma caminhonete de controle remoto que possui dois motores, um motor traseiro DC (*Direct Current*) e um motor de passo na dianteira que não foi utilizado nos experimentos realizados.

Os outros componentes que fazem parte do VE desenvolvido são: uma placa de controle do tipo Arduino Uno com (microprocessador ATmega328), uma bateria LiPO (*Lithium-Polymer*) de 11.1 V, um rádio emissor modelo nrf24L01+, um sensor do tipo acelerômetro, um divisor de tensão de 11.1 V para até 5 V, onde é possível medir a carga da bateria pela porta analógica do Arduino, um divisor de corrente de 1.6 Ω , para ser possível medir a quantidade de corrente que o motor está consumindo.

Para controlar o motor foi necessário um driver de potência do tipo L298N, que implementa duas pontes H. A Figura 7 ilustra o protótipo construído que foi utilizado para realizar os testes nos três cenários propostos.

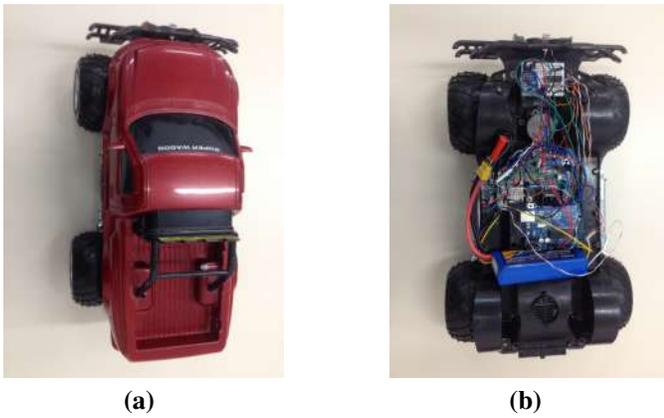


Figura 7. Protótipo Construído. (a) visão externa. (b) visão interna com a placa de controle.

O sistema de controle desenvolvido utiliza uma porta PWM do Arduino para controlar a velocidade do VE, esta porta é de 8 bits, portanto, permite uma variação de 0 a 255 (0 V a 5 V). O sinal PWM 0 (zero) corresponde a 0 V de tensão para o motor, e o sinal PWM 255 corresponde a 11.1 V.

A velocidade do VE é controlada a partir da modulação PWM que funciona basicamente por meio de uma onda de sinal digital, que possui frequência constante e largura de pulso (*duty cycle*) variável. Sendo possível controlar as correntes sobre os indutores de entrada do motor, controlando o fluxo de energia, podendo assim controlar a velocidade enviada para o motor através dos ciclos de pulsos [34].

B. Sistema de Controle Fuzzy Desenvolvido

Com a utilização da Lógica Fuzzy (LF) no sistema de controle, foi possível determinar valores intermediários entre a superfície plana, declive e aactive, tais como: pouco declive e pouco aactive. Para a realização dos experimentos foi necessário calibrar o acelerômetro como ilustra a Tabela I.

Tabela I
RELAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS COM O ACELERÔMETRO

Superfície	Valor acelerômetro
Plano	2° até 8°
Pouco aactive	6° até 15°
Aactive	12° até 70°
Pouco declive	-10° até 4°
Declive	-70° até -8°

O estado da bateria é controlado pela leitura de um divisor de tensão em uma porta analógica que varia entre 0 e 1024 no qual é convertido para o valor real da bateria que é de 0 V a 11.1 V. Através dessa leitura é possível dividir a bateria em 4 estados, listados na Tabela II.

Tabela II
RELAÇÃO DO ESTADO DA BATERIA COM SUA CARGA EM V

Estado da Bateria	Carga em V
Crítico	0 até 7
Metade da Carga	6 até 9
Quase Completa	8 até 10.5
Completa	10 até 11.1

O SCF receberá duas variáveis de entrada (Bateria e Acelerômetro), que passam pelo processo de fuzzificação, gerando os conjuntos Fuzzy de entrada para o processo de inferência, utilizando o método do tipo mamdani escolhe a melhor regra, de acordo com o

grau de pertinência. Após este processo é gerado os conjuntos Fuzzy de saída que passam pelo processo de defuzzificação, que utiliza o método da centróide para determinar o melhor valor para a variável de saída (Velocidade). Este processo é ilustrado no diagrama da Figura 8.



Figura 8. Diagrama do Processo de Inferência Fuzzy. Extraído e Adaptado de: [19]

Foi desenvolvido 16 (dezesseis) regras para o processo de inferência, sendo algumas delas do tipo *JoinSingle*, onde se tem apenas uma variável de entrada, e a tipo *joinWithAND*, onde se tem duas ou mais variáveis de entrada para ser analisada no processo de inferência, detalhes a seguir.

1) *Regra 1:* É do tipo *JoinSingle*, significa que é utilizado somente uma variável de entrada no processo de inferência. Esta regra tem como objetivo verificar se o estado da bateria está crítico e inferir que deve ser enviado a velocidade PWM correspondente ao estado parado do VE. Abaixo é ilustrado o código implementado.

```
// Instanciando um Antecedente para a expressão
FuzzyRuleAntecedent* ifBateriaCritico =
= new FuzzyRuleAntecedent();

ifBateriaCritico->joinSingle(critico);

// Instanciando um Consequente para a expressão
FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeParado =
= new FuzzyRuleConsequent();

//Add FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
thenVelocidadeParado->addOutput(SaidaParado);

// Instanciando um objeto FuzzyRule
FuzzyRule* fuzzyRegra01 =
= new FuzzyRule(1, ifBateriaCritico, thenVelocidadeParado);

fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRegra01);
```

2) *Regra 2:* É do tipo *joinWithAND*, ou seja, tem como entrada duas variáveis. Nesta regra é verificado se o veículo elétrico (VE) encontra-se em uma superfície plana e se a bateria contém metade da carga, caso o VE se encontrar nessa situação é enviado para o motor o valor de saída correspondente ao estado Saída Rápido. O código pode ser visualizado abaixo.

Seção VII-C descreve os resultados obtidos no Declive, e na Seção VII-D são descritos os resultados obtidos no Plano.

B. Cenário 1: Aclive

Neste experimento foi utilizado um ambiente de testes com 7,8 metros com aproximadamente 5° de inclinação. A Figura 9 ilustra este ambiente.



Figura 9. Ambiente de Testes para o Experimento Aclive.

```
// Instanciando um Antecedente para a expressão
FuzzyRuleAntecedent* ifPlanoAndMetadeCarga =
    new FuzzyRuleAntecedent();

ifPlanoAndMetadeCarga->joinWithAND(Plano, MetadeCarga);

// Instanciando um Consequente para a expressao
FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeRapidol3 =
    new FuzzyRuleConsequent();

// Add o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
thenVelocidadeRapidol3->addOutput(SaidaRapido);

// Instanciando um objeto FuzzyRule
FuzzyRule* fuzzyRule02 = new
FuzzyRule(2,ifPlanoAndMetadeCarga,thenVelocidadeRapidol3);

fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule02);
```

VII. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

Para realizar os experimentos foram considerados três cenários: plano, aclive e declive. O aclive e o declive possuem uma inclinação de aproximadamente 5°. Em cada um dos cenários realizou-se 10 (dez) experimentos para que fosse possível obter uma média dos resultados e descartados a melhor e a pior média de leitura de cada experimento dos dois sistemas para diminuir o desvio padrão. Com o objetivo de verificar a eficiência do SCF desenvolvido, os resultados obtidos foram comparados aos resultados obtidos com um Sistema *If-Else* descrito na próxima seção.

A. Sistema de Controle If-Else

Para avaliar o desempenho do SCF foi desenvolvido para fins de comparação um sistema de controle baseado em regras *If-Else*, intitulado Sistema de Controle *If-Else* (SIF). O VE pode estar em uma superfície plana, declive ou aclive. O VE faz sua tomada de decisão conforme a variação do acelerômetro e o estado da bateria.

Caso a carga da bateria seja menor que 7 V, o sistema de controle considera que está em um estado crítico porque com 7V de alimentação o motor não irá gerar força suficiente para vencer a inércia. No entanto, se carga da bateria for maior que 7 V e menor que 10 V e o VE se encontrar em uma superfície plana (quando o valor lido do acelerômetro for maior que 2° e menor que 6°), a velocidade PWM enviada para o motor será de 148. Esses valores PWM foram determinados por meio de testes para encontrar a menor velocidade que conseguisse sair da inércia na respectiva superfície.

Quando o estado da bateria estiver na metade da carga e o VE se encontrar em uma superfície de aclive (quando o valor lido do acelerômetro for maior que 6°), a velocidade PWM enviada para o motor será de 222. Caso o estado da bateria indique metade da carga e o VE se encontrar em uma superfície de declive (quando o valor lido do acelerômetro for menor que 2°), a velocidade PWM enviada para o motor será de 40.

Na circunstância em que o VE estiver com a carga da bateria completa entre 9 V e 11 V e em uma superfície plana, a velocidade PWM enviada para o motor será de 82. O VE com a mesma situação de carga de bateria também pode encontrar-se em uma superfície de declive cuja a velocidade PWM enviada para o motor será de 40 ou em uma superfície de declive, neste caso, a velocidade enviada para o motor será de 185.

Abaixo são descritos os resultados obtidos na avaliação do SCF proposto. A Seção VII-B depreve os resultados obtidos no Aclive; a

A Figura 10 apresenta os resultados das oito médias de velocidade em PWM com relação a variação do acelerômetro. A série de dados em vermelho ilustra o desempenho do SIF e a série de dados em azul ilustra o desempenho do SCF.

Podemos verificar que o SCF conseguiu manter uma média de velocidade menor que o SIF, entretanto em algumas leituras a média do acelerômetro foi maior, mas não impactou no desempenho do sistema. Esta análise pode ser verificada na leitura 4 e na leitura 5 da Figura 10.

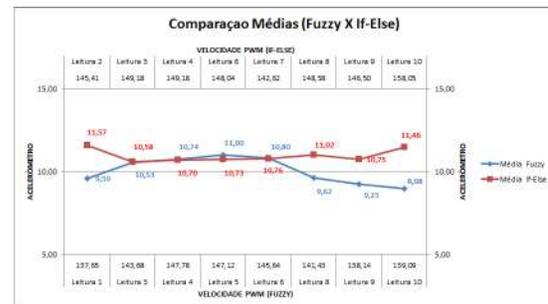


Figura 10. Médias da Velocidade PWM entre o SCF e o SIF.

O gráfico da Figura 11 apresenta a média da corrente consumida por ambos os sistemas. É possível observar que o SCF obteve melhores resultados em praticamente todas as leituras.

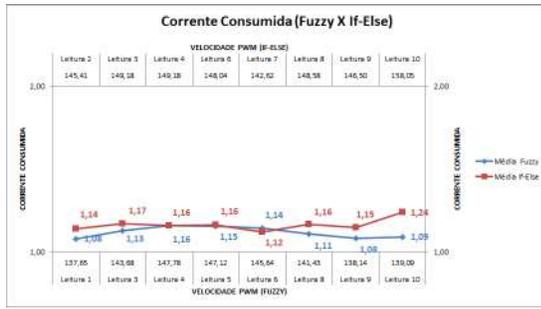


Figura 11. Médias da Corrente Consumida entre o SCF e o SIF.

A Figura 12 ilustra o gráfico da eficiência do SCF sobre o SIF, onde dos oito experimentos, o SCF ficou em desvantagem em apenas dois, como pode ser verificado na leitura 4 e 6 do SCF. Como pode ser verificado na leitura 4, a média da corrente consumida está igual em ambos os sistemas, isto se dá devido ao gráfico ter sido gerado com apenas duas casas após a virgula, sendo que os dados foram arredondados. A média da corrente consumida pelo SIF foi de 1,156 e o de SCF foi de 1,158.

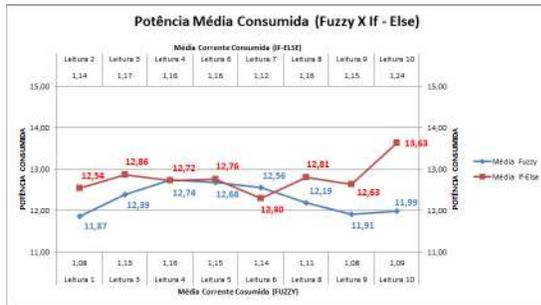


Figura 12. Médias da Potência Consumida entre o SCF e o SIF

C. Cenário 2: Declive

Para a realização do experimento 2 foi utilizado uma pista de testes com aproximadamente 7,8 metros e 5° de declive. A Figura 13 ilustra o ambiente.



Figura 13. Ambiente de Testes para o Experimento Declive.

O gráfico ilustrado na Figura 14 apresenta os resultados das oito médias de velocidade em PWM com relação a variação do acelerômetro. A série de dados em vermelho ilustra o desempenho do SIF e a série de dados em azul ilustra o desempenho do SCF.

Pode ser verificado que o SCF conseguiu manter uma média de velocidade menor que o SIF, somente em uma das leituras obteve a média de velocidade superior ao SIF, o que pode ser constatado na Figura 14.

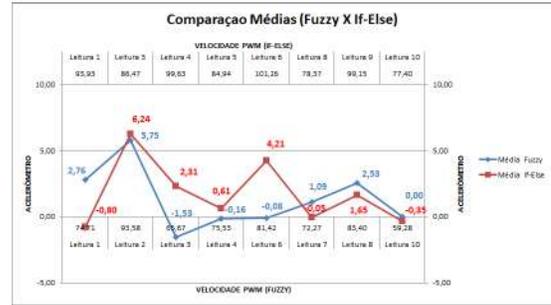


Figura 14. Médias das Velocidade PWM entre o SCF e o SIF.

A corrente consumida por ambos os sistemas é ilustrada no gráfico da Figura 15. É possível observar que o SCF consumiu menos corrente do que o sistema SIF.

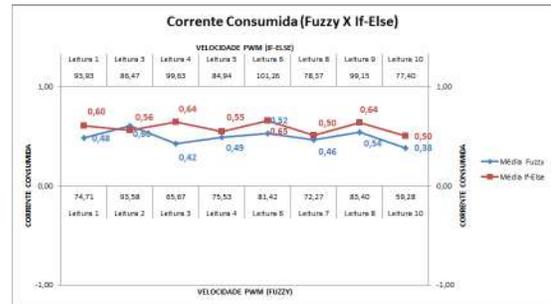


Figura 15. Médias da Corrente Consumida entre o SCF e o SIF.

O gráfico ilustrado na Figura 16 demonstra a eficiência no consumo da potência do SCF e do SIF. O sistema SCF obteve uma média inferior ao SIF em apenas uma leitura.

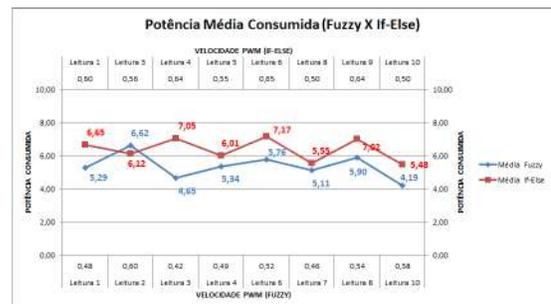


Figura 16. Médias da Potencia Consumida entre o SCF e o SIF.

D. Cenário 3: Plano

Para a realização deste experimento foi utilizado uma pista de testes plana com 7,4 metros, a qual é ilustrada na Figura 17.



Figura 17. Ambiente de Testes para o Experimento Plano.

Como pode ser visualizado na Figura 18, a relação da velocidade PWM com a variação do acelerômetro foi maior com o SCF do que com o SIF em todas as leituras deste experimento. Essas interferências ocorreram no SCF devido as imperfeições do ambiente de testes.

O SCF considera que está em uma superfície plana quando o valor retornado na leitura do acelerômetro está entre 2° e 8°, em uma superfície de pouco acline quando o valor obtido na saída do acelerômetro está entre 6° e 15°. Devido as imperfeições do ambiente de testes em algumas leituras o SCF considerou que o VE estava em uma superfície de pouco acline, por isso inferiu a regra equivalente para este tipo de ambiente, consequentemente a média da velocidade PWM foi maior para este sistema.

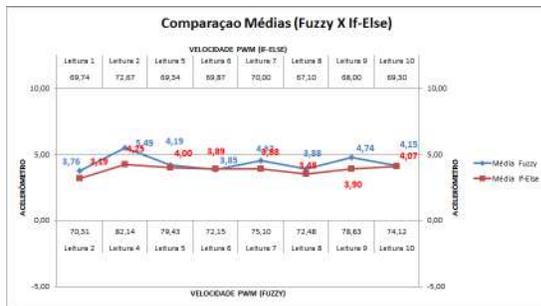


Figura 18. Médias da Velocidade PWM entre o SCF e o SIF.

A corrente consumida por ambos os sistemas é ilustrada no gráfico da Figura 19. É possível observar que o SCF consumiu mais corrente do que o sistema SIF em quase todos os testes, com exceção do primeiro, onde ocorreu um empate na leitura 1 do SCF com a leitura 2 do SIF.

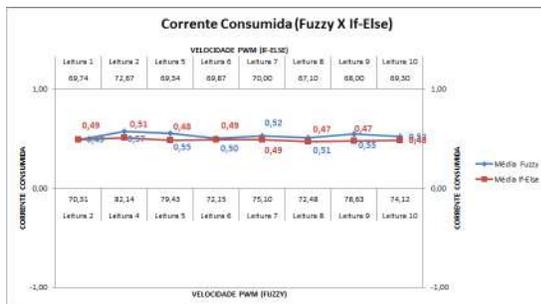


Figura 19. Médias da Corrente Consumida entre o SCF e o SIF.

No gráfico ilustrado na Figura 20 pode ser verificado a média da potência consumida pelo SCF e o SIF. O sistema SCF, representado em azul, sofreu interferência no ambiente de testes, mas manteve a potência média consumida próxima ao obtido pelo SIF.

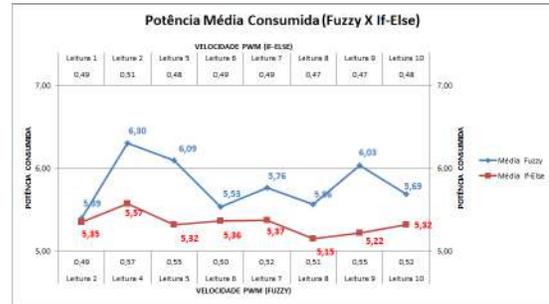


Figura 20. Médias da Potência Consumida entre o SCF e o SIF.

No SIF a variação do ambiente de testes contribuiu positivamente, visto que a variação do acelerômetro foi menor. Neste caso, o sistema considerou que o VE estava em uma superfície de declive, fazendo com que o sistema determinasse a velocidade correspondente para esta condição, ou seja, o sistema determinou uma velocidade PWM 40.

VIII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os veículos elétricos (VE) estão cada vez mais presentes no mercado automobilístico devido ao aumento excessivo de emissão de gases de efeito estufa ocasionado, principalmente, pelos veículos com motores de combustão interna. Os VEs são considerados zero emissão de poluentes.

Afim de comprovar e avaliar os benefícios do uso da Lógica Fuzzy no controle da eficiência energética de um VE, este trabalho apresentou uma arquitetura de controle para os VEs e um sistema de controle utilizando Lógica Fuzzy (SCF) para aumentar a eficiência energética de um VE. Para realizar a avaliação foi desenvolvido um sistema de controle *If-Else* e realizado alguns experimentos em acline, declive e plano com os dois sistemas.

Visando a eficiência energética do VE foi utilizado como variáveis de entrada o valor obtido de um sensor do tipo acelerômetro, que determinava em qual tipo de superfície o VE se encontrava, um divisor de tensão para obter a tensão da bateria e de acordo com a base de regras obter a melhor saída. Para gerar o arquivo de log com o valor da corrente consumida e potência consumida, foi utilizado um divisor de corrente, no qual foi possível saber a quantidade de corrente que o motor estava consumindo e consequentemente calcular a potência consumida pelo motor.

Para que fosse possível obter uma média de leituras foram realizados 10 experimentos comparativos entre o SCF e o sistema de controle com *If-Else* (SIF) em cada cenário, sendo que foram considerados somente os dados de 8 (oito) experimentos sendo descartados os melhores e os piores valores.

Os resultados obtidos nos experimentos demonstraram que o SCF proposto foi responsável por manter o controle da velocidade estável, diminuindo o consumo da corrente, e consequentemente, a potência consumida nos ambientes de acline e declive. Na superfície plana também se mostrou estável, entretanto o SIF obteve uma ligeira vantagem porque não sofreu grandes variações nos valores obtidos com o acelerômetro.

Por fim, conclui-se que o SCF conseguiu manter uma velocidade estável e adequada nos testes realizados, mesmo com grandes variações nos cenários de testes a Lógica Fuzzy garantiu maior estabilidade ao sistema de controle.

REFERÊNCIAS

- [1] J. GOLDEMBERG, “World energy assessment: Energy and the challenge of sustainability,” *United Nations Pubns*, 2000. ISBN 9211261260., 2000.
- [2] E. G. do Amaral, “Veículo elétrico com sistema energético híbrido: Célula de combustível/baterias eletroquímicas,” 1998.
- [3] C. N. d. T. CNT, “A fase p7 do proconve e o impacto no setor de transporte,” Programa Despoluir, 2012, sest/Senat, 2012.
- [4] R. Gammariello and M. Carlock, “California air resources board,” 1997.
- [5] S. LEITMAN and B. BRANT, *Build your own electric vehicle.*, 2nd ed. McGraw-Hill, 2009. ISBN 0071543732., 2009.
- [6] J. R. B. d. C. Braga, “Integração de veículos elétricos no sistema elétrico nacional,” 2010.
- [7] G. A. G. DOS SANTOS, B. G. DOS SANTOS, R. L. Medeiros, and R. P. de Araújo, “Carro elétrico, a revolução geopolítica e econômica do século XXI e o desenvolvimento do Brasil,” 2009.
- [8] K. G. Hoyer, “The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars,” *Utilities Policy*, vol. 16, no. 2, pp. 63–71, 2008.
- [9] R. Baran and L. F. L. Legey, “Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil,” 2010.
- [10] V. Santos, “Conversão de veículos convencionais em veículos elétricos,” *Seminário: Mobilidade Elétrica: O Veículo*, 2010.
- [11] D. G. R. Morgado, “Controle de velocidade de um veículo elétrico autônomo,” 2013.
- [12] C. D. Anderson and J. Anderson, *Electric and hybrid cars: A history*, 2nd ed. McFarland, 2010.
- [13] D. Sperling, “Gearing up for electric cars,” *University of California Transportation Center*, 1994.
- [14] BMW, “Bmw i3 born electric,” Disponível em: <http://www.novobmw.com.br/index.html> Acessado em: 18 de Novembro de 2014.
- [15] FIA, “Formula-e championship,” Disponível em: <http://www.fiaformulae.com/en/guide/overview.aspx> Acessado em: 18 de Novembro de 2014.
- [16] M. G. Simões and I. S. SHAW, “Controle e modelagem fuzzy,” *São Paulo. Blucher: Fapesp*, 2007.
- [17] R. R. Goldschmidt, *Uma Introdução à Inteligência Computacional: fundamentos, ferramentas e aplicações*. Série de Livros Didáticos Digitais, Instituto Superior de Tecnologia do Rio de Janeiro, 2010.
- [18] E. Camponogara, “Introdução a inteligência computacional,” *Universidade Federal de Santa Catarina: Departamento de Automação e Sistemas, Santa Catarina, Brasil, Documentation*, 2006.
- [19] S. F. da Silva, “Identificação de torque de carga em motores de indução usando abordagem baseada em sistemas fuzzy,” Master’s thesis, Universidade de São Paulo, 2007.
- [20] S. Sivanandam, S. Sumathi, S. Deepa *et al.*, *Introduction to fuzzy logic using MATLAB*. Springer, 2007, vol. 1.
- [21] T. Terra *et al.*, “Aplicação de lógica fuzzy no controle de trânsito urbano,” 2002.
- [22] M. Amendola, A. Souza, and L. C. BARROS, “Manual do uso da teoria dos conjuntos fuzzy no matlab 6.5,” *Campinas: CPG/FEAGRI/UNI-CAMP*, 2004.
- [23] A. Biazin, “Um modelo de integração de lógica fuzzy a banco de dados convencionais,” 2002.
- [24] A. M. Vaz, “Estudo das funções de pertinência para conjuntos fuzzy utilizados em controladores semafóricos fuzzy,” *Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental*, 2006.
- [25] B. Coppin, “Inteligência artificial/ben coppin; tradução e revisão técnica Jorge Duarte Pires Valério,” *Rio de Janeiro: LTC*, 2010.
- [26] T. Kohagura, “Lógica fuzzy e suas aplicações,” *Departamento de Computação*, 2007.
- [27] E. COX, *The fuzzy systems handbook: a practitioner’s guide to building, using, and maintaining fuzzy systems*. AP Professional, 1994.
- [28] M. Sugeno, “An introductory survey of fuzzy control,” *Information sciences*, vol. 36, no. 1, pp. 59–83, 1985.
- [29] M. Andrade and M. A. P. Jacques, “Estudo comparativo de controladores mamdani e sugeno para controle de tráfego em interseções isoladas,” *Revista Transportes*, vol. v. 16, no. 2, 2008.
- [30] R. d. A. L. RABÊLO, A. A. d. F. M. Carneiro, R. A. S. Fernandes, and R. T. V. Braga, “Uma abordagem baseada em sistemas de inferência fuzzy takagi-sugeno aplicada ao planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de geração,” *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, vol. 22, no. 1, pp. 49–64, 2011.
- [31] P. E. M. d. ALMEIDA and A. G. Evsukoff, “Sistemas fuzzy,” *Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações, 1ª Ed. São Paulo: Manole*, pp. 89–114, 2003.
- [32] A. J. Alves, “efl - biblioteca fuzzy em c++,” Disponível em: <http://zerokol.com/post/51e9324ee84c55a1f500007/1/pt-BR> Acessado em: 26 de novembro de 2014.
- [33] C. E. Milhor, “Sistema de desenvolvimento para controle eletrônico dos motores de combustão interna ciclo otto,” Master’s thesis, Universidade de São Paulo, 2002.
- [34] D. Borgonovo, “Análise modelagem e controle de retificadores pwm trifásicos,” Ph.D. dissertation, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis-SC, Junho 2005.

Luiz da Rocha Farias Bacharel em Tecnologias da Informação e Comunicação pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Atualmente, mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Ponta Grossa.

Anderson Luiz Fernandes Perez Professor do curso de Tecnologias da Informação e Comunicação e Engenharia da Computação na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Membro do Laboratório de Automação e Robótica Móvel.

Patrícia Bordignon André Bacharela em Tecnologias da Informação e Comunicação pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Atualmente, mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).