

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ**

Luiz da Rocha Farias

**APLICAÇÃO DE LÓGICA FUZZY NO CONTROLE DO
CONSUMO DE ENERGIA EM VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Araranguá, dezembro de 2014.

Luiz da Rocha Farias

**APLICAÇÃO DE LÓGICA FUZZY NO CONTROLE DO
CONSUMO DE ENERGIA EM VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Bacharel em Tecnologias da Informação e Comunicação.

Araranguá, dezembro de 2014.

Luiz da Rocha Farias

APLICAÇÃO DE LÓGICA FUZZY NO CONTROLE DO CONSUMO DE ENERGIA EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

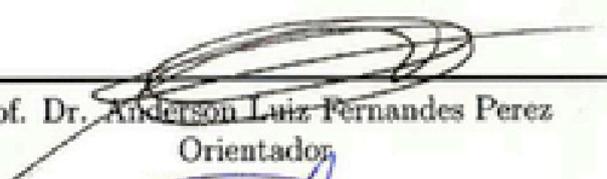
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado aprovado para a obtenção do Título de “Bacharel em Tecnologias da Informação e Comunicação”, e aprovado em sua forma final pela Curso de Graduação em Tecnologias da Informação e Comunicação.

Araranguá, dezembro de 2014.

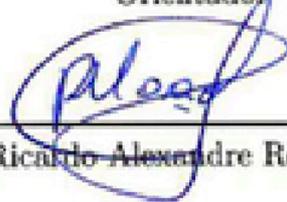


Prof. Dr. Vilson Gruber
Coordenador do Curso

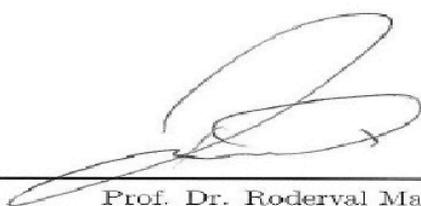
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Anderson Luiz Fernandes Perez
Orientador



Prof. Dr. Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the left.

Prof. Dr. Roderval Marcelino

Dedico este trabalho primeiramente à minha Mãe Marlene, meu Pai Luiz, à minha Irmã Bruna e minha sobrinha Bianca, pois confiaram em mim e me deram esta oportunidade de concretizar e encerrar mais uma caminhada da minha vida. Sei que eles não mediram esforços para que esse sonho se concretizasse. Aos meus familiares e em especial ao meu avô Mario Farias (In Memoriam) que mesmo longe sempre esteve presente em meus pensamentos. Saudades Eternas Vô! Muito obrigado por tudo!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade concedida, aos meus pais que sempre me incentivaram estudar e ir em busca dos meus sonhos. Aos meus familiares e amigos de Itariri que me deram forças para iniciar a trajetória árdua que foi minha vivência longe de todos que fizeram parte da minha infância. À minha namorada Daniela que teve paciência em momentos difíceis que passei no desenvolvimento desse trabalho. Aos colegas do LARM, em especial à Patrícia, que sempre estiveram dispostos a ajudar para que fosse possível a realização desse trabalho. Ao meu orientador Anderson que foi um pai dentro da universidade, sempre me incentivando e me dando forças para continuar.

*O insucesso é apenas uma oportunidade
para recomeçar de novo com mais inte-
ligência.*

Henry Ford

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 aclive). 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-chave: veículos elétricos, eficiência energética, lógica fuzzy, sistema de controle.

ABSTRACT

This paper describes the design and development of a control system for an electric vehicle. The theme “Electric Vehicles” returned to the fore in recent years due to the need to build less polluting vehicles and despite the research in this area have advanced greatly, there are some points that should be improved and one of them is the energy efficiency of the vehicle. In order to increase the energy efficiency of an electric vehicle was developed a control system using Fuzzy Logic which was valued at different surface situations, plan, downhill and uphill. However, the results obtained with the control system showed that it was able to maintain the stability of the velocity, thereby decreasing the consumption current and the power consumed by the electric vehicle even in imprecise environments.

Keywords: Electric vehicles, energy efficiency, fuzzy logic, control system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Ciclo de Trabalho dos Motores Ciclo Otto (4 tempos)..	30
Figura 2	Ciclo de Trabalho dos Motores Ciclo Diesel (4 tempos).	32
Figura 3	Diagrama Veículo Elétrico.	38
Figura 4	Carro Elétrico i3 da BMW.....	39
Figura 5	Carro Elétrico Volt da GM.....	39
Figura 6	Veículo Elétrico Utilizado na Formula-e.	40
Figura 7	Configurações Básicas de um VEH.....	41
Figura 8	Exemplos de Veículos Elétricos Híbridos (a) Honda Jazz. (b) Toyota Prius.....	42
Figura 9	Motor de corrente contínua.	43
Figura 10	Os tipos de rotores e exemplo de um estator.	45
Figura 11	Exemplo de um Conjunto Clássico.	48
Figura 12	Função de Pertinência para o Conjunto Fuzzy que repre- senta o Lucro Diário de uma Empresa.	50
Figura 13	Operações básicas da Lógica Fuzzy.....	51
Figura 14	Função Triangular e Função Trapezoidal.	53
Figura 15	Arquitetura de Controle Proposta.....	57
Figura 16	Interface do Sistema de Telemetria.....	58
Figura 17	Protótipo Construído. (a) visão externa. (b) visão in- terna com a placa de controle.....	59
Figura 18	Diagrama do Processo de Inferência Fuzzy.	61
Figura 19	Modelagem das variáveis de entrada e de saída no MA- TLAB.....	62
Figura 20	Ambiente de Testes para o Experimento Aclive.....	64
Figura 21	Médias da Velocidade PWM entre o SCF e o SIF.	65
Figura 22	Médias da Corrente Consumida entre o SCF e o SIF... ..	66
Figura 23	Médias da Potência Consumida entre o SCF e o SIF... ..	67
Figura 24	Ambiente de Testes para o Experimento Declive.....	68
Figura 25	Médias das Velocidade PWM entre o SCF e o SIF.	69
Figura 26	Médias da Corrente Consumida entre o SCF e o SIF... ..	69
Figura 27	Médias da Potencia Consumida entre o SCF e o SIF... ..	70
Figura 28	Ambiente de Testes para o Experimento Plano.....	71
Figura 29	Médias da Velocidade PWM entre o SCF e o SIF.	72

Figura 30	Médias da Corrente Consumida entre o SCF e o SIF. . .	72
Figura 31	Médias da Potência Consumida entre o SCF e o SIF. . .	73
Figura 32	Resultados comparativos (Aclive) entre o SCF e o SIF.	96
Figura 33	Resultados comparativos (Declive) entre o SCF e o SIF.	97
Figura 34	Resultados comparativos (Plano) entre o SCF e o SIF..	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Tipos de Baterias.....	37
Tabela 2	Relação do Estado da Bateria com sua Carga em V....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores	25
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente.....	25
EUA	Estados Unidos da América.....	25
CARB	<i>California Air Resources Board</i>	25
VE	Veículo Elétrico.....	25
ZE	Zero Emissão	26
LF	Lógica Fuzzy	26
SCF	Sistema de Controle Fuzzy.....	27
PMS	Ponto Morto Superior	30
PMI	Ponto Morto Inferior	30
NO _x	Óxidos de Nitrogênio	35
CO	Monóxido de Carbono	35
HC	Hidrocarbonetos	35
NO	Óxido Nítrico.....	35
GM	<i>General Motors</i>	39
FIA	<i>Fédération Internationale de l'Automobile</i>	39
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento.....	40
VEH	Veículos Elétricos Híbridos.....	40
MCI	Motor de Combustão Interna	40
MCC	Motores de Corrente Contínua	42
MCA	Motores de Corrente Alternada	43
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>	58
SIF	Sistema de Controle <i>If-Else</i>	63

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 OBJETIVOS	26
1.1.1 Geral	26
1.1.2 Específicos	26
1.2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	26
1.3 METODOLOGIA	27
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
2 VEÍCULOS AUTOMOTORES	29
2.1 BREVE HISTÓRICO DOS VEÍCULOS AUTOMOTORES .	29
2.2 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	29
2.2.1 Ciclo Otto	30
2.2.2 Ciclo Diesel	31
2.3 PROGRAMA DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR POR VEÍCULOS AUTOMOTORES	33
2.4 VEÍCULOS ELÉTRICOS	36
2.5 VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS	40
2.6 MOTORES ELÉTRICOS	42
2.6.1 Motores de corrente Contínua	42
2.6.2 Motores de corrente Alternada	43
3 FUNDAMENTOS DE LÓGICA FUZZY	47
3.1 BREVE HISTÓRICO	47
3.2 CONJUNTOS CLÁSSICOS VERSUS CONJUNTOS FUZZY	47
3.2.1 Conjuntos Clássicos	48
3.2.2 Conjuntos Fuzzy	49
3.3 RACIOCÍNIO FUZZY	50
3.4 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	52
3.5 MÉTODOS DE DEFUZZIFICAÇÃO	54
3.5.1 Centróide	54
3.5.2 Média dos Máximos	55
3.5.3 Sistemas de Controle Fuzzy	55
4 ARQUITETURA DE CONTROLE PROPOSTA	57
4.1 CARACTERÍSTICAS DA ARQUITETURA PROPOSTA ..	57
4.2 VEÍCULO ELÉTRICO DESENVOLVIDO	59
4.2.1 Sistema de Controle Fuzzy	60
5 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS	63
5.1 METODOLOGIA EMPREGADA NOS EXPERIMENTOS .	63
5.1.1 Sistema de Controle <i>If-Else</i>	63

5.1.2 Cenário 1: Aclive	64
5.1.3 Cenário 2: Declive	67
5.1.4 Cenário 3: Plano	70
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	75
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	76
REFERÊNCIAS	77
APÊNDICE A – Modelagem do Sistema de Controle Fuzzy e Listagem dos Dados obtidos nos Experimentos Realizados	85

1 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 (GOLDEMBERG, 2000). Mediante a este fato e por pressões de ambientalista os países industrializados estão propondo novas medidas para a redução do uso de combustíveis não renováveis, por consequência gerando uma diminuição de poluentes lançados no meio ambiente (AMARAL, 1998).

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 (CO), dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de carbono (CO₂) (AMARAL, 1998).

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 (IBAMA, 2011).

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% (GAMMARIELLO; CARLOCK, 1997) (AMARAL, 1998). Esta foi a medida mais radical, em resposta a proposta da CARB as montadoras voltaram a investir no Veículo Elétrico (VE) (LEITMAN; BRANT,

2009).

O 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 (LEITMAN; BRANT, 2009). 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 (BRAGA, 2010).

1.1 OBJETIVOS

Esta sessão apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho de conclusão de curso.

1.1.1 Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de controle utilizando Lógica Fuzzy (LF) visando a eficiência energética de um Veículo Elétrico (VE).

1.1.2 Específicos

Para atingir o objetivo proposto, alguns objetivos específicos são requeridos, entre eles:

1. Estudar o estado da arte dos veículos elétricos;
2. Estudar a LF para o desenvolvimento do sistema de controle;
3. Desenvolver o sistema de controle do VE utilizando LF;
4. Avaliar o sistema desenvolvido em ambientes reais;
5. Comparar os resultados obtidos em (4) com os obtidos com um sistema *If-Else*.

1.2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Devido ao crescimento elevado da frota de veículos automotores no mundo, a emissão de gases poluentes para o meio ambiente vem cres-

cendo drasticamente. O VE é a solução mais próxima de ZE, podendo aproveitar as fontes alternativas de geração de energia elétrica.

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 SANTOS et al. (2009), 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 LF para aumentar a eficiência energética de um VE em um ambiente plano, de aclive e de declive.

1.3 METODOLOGIA

Este trabalho é uma pesquisa tecnológica que visa o desenvolvimento de um sistema de controle fuzzy (SCF) para VEs.

A partir da revisão bibliográfica das áreas, Veículos Automotores (Capítulo 2) e Lógica Fuzzy (Capítulo 3) foi possível adquirir conhecimentos para o desenvolver um protótipo de veículo elétrico (descrito na Seção 4.2) e o SCF (descrito em detalhes na Seção 4.2.1).

O SCF foi desenvolvido para a plataforma de prototipação Arduino, na linguagem de programação C e utilizou a biblioteca Fuzzy eFLL (*Embedded Fuzzy Logic Library*) (ALVES, 2014).

Foram realizados experimentos em ambientes de testes reais de superfície plana, de aclive e declive, utilizando um sistema de telemetria desenvolvido na plataforma Java para capturar os dados do VE durante os experimentos.

Os dados capturados foram analisados e os resultados obtidos estão ilustrados graficamente no Capítulo 5.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além desta introdução, este trabalho contém mais 5 (cinco) capítulos.

O **capítulo 2** apresenta um breve histórico dos veículos automotores, e o funcionamento dos motores de combustão interna Ciclo Otto

e Ciclo Diesel, dos veículos elétricos e dos veículos híbridos. O capítulo também apresenta uma breve introdução sobre as medidas tomadas para diminuir a emissão de gases poluentes para o meio ambiente.

O **capítulo 3** apresenta um breve histórico da Lógica Fuzzy. Apresenta uma introdução sobre conjuntos clássicos e surgimento dos conjuntos fuzzy. O capítulo também descreve o funcionamento dos sistemas fuzzy do tipo Mamdani e Takagi-Sugeno.

O **capítulo 4** descreve em detalhes a arquitetura de controle fuzzy desenvolvida para um veículo elétrico, descrevendo também o protótipo de um veículo elétrico desenvolvido e utilizado para testar a arquitetura de controle proposta.

O **capítulo 5** apresenta os resultados da avaliação do Sistema de Controle Fuzzy comparado com um Sistema de Controle *if-Else*.

O **capítulo 6** apresenta as considerações finais e algumas propostas para trabalhos futuros.

No **Apêndice A** é descrito em detalhes os conjuntos fuzzy utilizado no trabalho e as regras utilizadas no processo de inferência. O apêndice também apresenta a listagem dos dados obtidos nos experimentos realizados.

2 VEÍCULOS AUTOMOTORES

Este capítulo apresenta um breve histórico dos veículos automotores, e o funcionamento dos motores de combustão interna Ciclo Otto e Ciclo Diesel, dos veículos elétricos e dos veículos híbridos. O capítulo também apresenta uma breve introdução sobre as medidas tomadas para diminuir a emissão de gases poluentes para o meio ambiente.

2.1 BREVE HISTÓRICO DOS VEÍCULOS AUTOMOTORES

O automóvel começou com os planos teóricos para um veículo motorizado desenhado por Leonardo da Vinci e Isaac Newton. A honra final para a invenção do primeiro carro foi atribuída pela maioria dos historiadores para Nicos Joseph Cugnot, um engenheiro e mecânico das forças armadas francesa, que iniciou seu trabalho em 1765 e quatro anos mais tarde construiu um trator militar de três rodas com um motor movido a vapor, do tipo combustão externa (DUTTON, 2006).

Em 1860, o belga Étienne Lenoir construiu o primeiro automóvel com motor de combustão interna, movido por gás de carvão. O carro percorreu aproximadamente 11,2 quilômetros em três horas. O engenheiro alemão Nikolaus Otto, desenvolveu um motor mais eficiente que trabalhava com quatro tempos. Karl Benz construiu o primeiro veículo com motor a combustão interna à gasolina, patenteado em 29 de janeiro de 1886. Mesmo assim o “pai” do motor de combustão interna continua sendo Nikolaus Otto (CAPELLI, 2012). O funcionamento desses motores é descrito em detalhes na Seção 2.2.

Com o passar do tempo os veículos com motores de combustão interna começaram causar problemas ambientais, visto que eles são movidos a combustíveis fósseis, nocivos para o meio ambiente. Diante desse cenário, os veículos elétricos (VEs) passaram a ser mais pesquisados e desenvolvidos (MORGADO, 2013). Na Seção 2.4 e na Seção 2.5 é descrito em detalhes os tipos de VEs existentes no mercado e seu funcionamento.

2.2 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Os Motores com Combustão Interna estão presentes na maioria dos veículos automotores e são divididos em duas categorias, conforme

o processo da queima do combustível, os de Ciclo Otto e os de Ciclo Diesel.

2.2.1 Ciclo Otto

Nos veículos com motores de combustão interna ciclo otto (4 tempos), um ciclo de trabalho termina quando o girabrequim (ou árvore de manivelas) completa a segunda volta. As bielas são responsáveis por transmitir o movimento realizado pelo girabrequim para os pistões que realizam o movimento rotativo entre o Ponto Morto Superior (PMS) e o Ponto Morto Inferior (PMI) (MILHOR, 2002). A Figura 1 ilustra os 4 tempos executados pelos pistões.

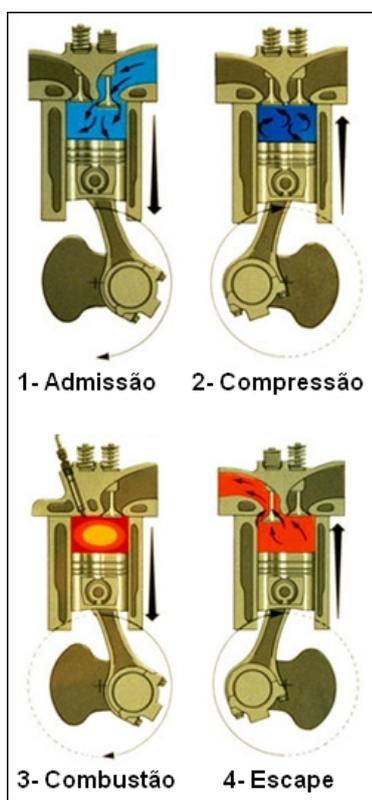


Figura 1: Ciclo de Trabalho dos Motores Ciclo Otto (4 tempos).

Extraído de: (MOTOR, 2014)

- **Admissão:** onde o pistão vai do PMS até PMI com a válvula de admissão aberta e a válvula de escape fechada. Com esse movimento realiza-se a mistura ar-combustível.
- **Compressão:** nesta etapa o pistão desloca-se do PMI para o

PMS com as válvulas fechadas, comprimindo a mistura ar-combustível na câmara de combustão. Antes do pistão chegar ao PMS, o sistema de ignição produz uma faísca através da vela de ignição do cilindro. A faísca provoca a queima da mistura ar-combustível fazendo com que a pressão no cilindro se eleve.

- **Expansão:** a pressão alta no cilindro, proporcionada pela queima da mistura ar-combustível, faz com que o pistão se desloque do PMS para o PMI com as válvulas ainda fechadas. É nessa etapa que a energia contida no combustível é liberada, transformando-se em movimento.
- **Exaustão:** nesta etapa o pistão se desloca do PMI para o PMS, a válvula de exaustão se abre e a mistura queimada é lançada para a atmosfera.

2.2.2 Ciclo Diesel

O funcionamento do motor ciclo diesel é muito semelhante com o de ciclo Otto. Partem do mesmo princípio, admissão, compressão, combustão e descarga. No ciclo Diesel, no primeiro tempo as válvulas de admissão se abrem e o pistão vai do PMS até o PMI retendo apenas o ar, diferente do ciclo Otto que neste ciclo realiza a mistura ar-combustível.

No segundo tempo o pistão sobe dentro do cilindro comprimindo o ar e elevando a temperatura para aproximadamente 600°C .

No terceiro tempo ocorre a mistura do ar com o combustível. Com a compressão do ar a temperatura se eleva, então quando o pistão chega ao PMS é injetada uma quantidade de diesel e há uma explosão dentro da câmara de combustão fazendo gerar a força que leva novamente o pistão do PMS para o PMI, determinando o fim do terceiro tempo.

O quarto tempo se dá quando o pistão volta do PMI para o PMS e a válvula de escape se abre para que os gases sejam liberados para a atmosfera (ROCHA, 2009). A Figura 2 ilustra os 4 tempos executados pelos pistões nos motores Ciclo Diesel.

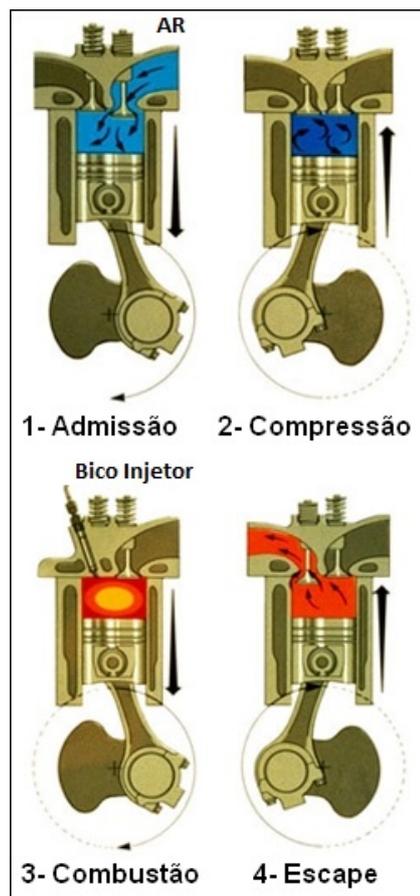


Figura 2: Ciclo de Trabalho dos Motores Ciclo Diesel (4 tempos).
Extraído e Adaptado de: (MOTOR, 2014)

Devido a queima de combustível desnecessário e o aumento de gases de efeito estufa na atmosfera, algumas tecnologias e programas de controle de poluição de ar foram criadas.

Em qualquer motor de combustão interna, como os supracitados, o combustível líquido precisa ser misturado com a quantidade certa de ar para poder formar a mistura ar-combustível adequada para que os pistões sejam capazes de produzir energia mecânica através da queima dessa mistura dentro do cilindro do motor. A maneira mais simples é usar um carburador, que faz a função de misturar com precisão a quantidade de combustível com a quantidade certa de ar.

Para que fosse possível controlar as emissões de poluentes dos escapes e atender as legislações dos Estados Unidos da América (EUA) do anos 80, foi necessário desenvolver um novo sistema de mistura de ar-combustível para diminuir a emissão de poluentes, denominado injeção eletrônica.

A maneira encontrada para desenvolver esse controlador foi calcular o valor exato de combustível que deve ser injetado na câmara de combustão, as quantidades exatas à injetar em diferentes situações de carga e velocidade são determinadas em testes de bancada e armazenadas na memória do controlador. Quando o motor está em funcionamento, são lidos os sensores e o controlador através de uma tabela armazenada escolhe a melhor quantidade de combustível a ser injetado na câmara de combustão (MARTINS, 2013).

Segundo Milhor (2002), o sistema de injeção eletrônica tem a função de dosar a quantidade de combustível em função da operação do motor. Seus principais benefícios são:

- Menor consumo de combustível;
- Maior potência;
- Aceleração sem atraso;
- Melhora da partida a frio, pois com o uso da injeção eletrônica é dispensada a utilização do afogador;
- Baixo teor de poluentes emitidos na atmosfera, tendo o motor em melhores condições de funcionamento e aproveitamento do combustível (injetando na melhor proporção), se reduzirá a sobra de combustível a ser liberada.

Os veículos automotores são fontes bastante significativas de emissões de poluentes do ar, principalmente nos grandes centros populacionais (urbanos) do país, onde sua contribuição chega a praticamente 100% do total de poluentes emitidos para a atmosfera (AMBIENTE, 2011). Diante deste cenário, o Brasil se viu obrigado a criar um programa de controle de poluição do ar. Esta iniciativa Brasileira foi chamada de Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), que é descrito em detalhes na Seção 2.3.

2.3 PROGRAMA DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR POR VEÍCULOS AUTOMOTORES

A poluição atmosférica urbana é considerada um dos problemas ambientais mais significativos para os países desenvolvidos ou em desenvolvimento. Os meios de transporte como automóveis, ônibus e caminhões são responsáveis por grande parte da degradação da qualidade ambiental nas áreas urbanas. O aumento das frotas de veículos

movidos a combustíveis fósseis, acarretaram um aumento preocupante dos níveis de emissões automotivas. Os veículos leves representam mais da metade das emissões totais de Monóxido de Carbono (CO) e Hidrocarbonetos (HC) (MENDES, 2004).

Devido a preocupação com a poluição do ar nos centros urbanos do país, fez com que o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) criasse em 1986 o PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores). Instituído pela resolução nº 18/86, o PROCONVE tem por objetivo diminuir a emissão de gases poluentes dos veículos novos por meio da implantação de fases que gradativamente obrigam a indústria automobilística a desenvolver novas tecnologias para diminuir a emissão de poluentes pelos veículos automotores (CNT, 2012).

Segundo CONAMA (1986), os principais objetivos do PROCONVE são:

- reduzir os níveis de emissão de poluentes por veículos automotores, visando o atendimento aos padrões de qualidade do ar, especialmente nos centros urbanos;
- promover o desenvolvimento tecnológico nacional, tanto na engenharia automobilística, como também em métodos e equipamentos para ensaios e medições da emissão de poluentes;
- criar programas de inspeção e manutenção para veículos automotores em uso;
- promover a conscientização da população com relação à questão da poluição do ar por veículos automotores;
- estabelecer condições de avaliação dos resultados alcançados;
- promover a melhoria das características técnicas dos combustíveis líquidos, postos à disposição da frota nacional de veículos automotores, visando a redução de emissões poluidoras à atmosfera.

Abaixo estão descritas as fases do PROCONVE para veículos leves e suas respectivas características.

- **Fase L-1 (1988-1991):** caracterizada pela eliminação dos modelos mais poluentes e apropriação dos projetos dos modelos já em produção. Iniciou-se também nessa fase o controle das emissões evaporativas. As principais inovações tecnológicas

que ocorreram nesta fase foram: reciclagem dos gases de escape para o controle das emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x); injeção secundária do ar no coletor de exaustão para o controle de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC); implantação de amortecedor da borboleta do carburador para o controle do HC e a otimização do avanço da ignição.

- **Fase L-2 (1992-1996):** a partir dos limites verificados na Resolução CONAMA 18 de 1986, investiu-se na adequação dos catalisadores e sistemas de injeção eletrônica para uso com mistura de etanol, em proporção única no mundo. As principais inovações nos veículos foram a injeção eletrônica, os carburadores assistidos eletronicamente e os conversores catalíticos. Em 1994 iniciou-se o controle ruído dos veículos.
- **Fase L-3 (1997-2004):** em face da exigência de atender aos limites estabelecidos a partir de 1º de janeiro de 1997 (Resolução do CONAMA 15 de 1995), ocorreram reduções bastante significativas em relação aos limites anteriores, e o fabricante/importador empregou, conjuntamente, as melhores tecnologias disponíveis para a formação de mistura e controle eletrônico do motor como, por exemplo, o sensor de oxigênio (denominado “sonda lambda”).
- **Fase L-4 (2005-2008):** tendo como referência a Resolução CONAMA Nº 315 de 2002, a prioridade nesta fase que teve início no ano de 2005 é a redução das emissões de HC e NO_x (substâncias precursoras de Ozônio). Para o atendimento desta fase, se deu o desenvolvimento de motores com novas tecnologias como a otimização da geometria da câmara de combustão e dos bicos de injeção, o aumento da pressão da bomba injetora e a injeção eletrônica.
- **Fase L-5 (2009-2013):** com os limites de emissão da Resolução CONAMA Nº 315 de 2002, da mesma forma que a fase L-4, a prioridade da fase L-5 é a redução das emissões de HC e óxido nítrico (NO). De maneira análoga à fase L-4, as inovações tecnológicas se deram na otimização da geometria da câmara de combustão e dos bicos injetores, o aumento da pressão da bomba injetora e a injeção eletrônica. Nesta fase deu-se a redução de 31% das emissões de hidrocarbonetos não-metano para os veículos leves do Ciclo Otto e de 48% e 42% para as emissões de NO_x para os veículos leves Ciclo Otto e diesel, respectivamente. Além disso,

as emissões de aldeídos foram reduzidas em, aproximadamente, 67% para os veículos Ciclo Otto.

Na Seção 2.4 e na Seção 2.5 é descrito em detalhes o funcionamento de dois dos grandes aliados à diminuição da poluição do ar.

2.4 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 (HOYER, 2008).

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 (BARAN; LEGEY, 2010).

De acordo com Santos (2010), 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.

A Tabela 1 lista os tipos de baterias presentes nos veículos elétricos e suas principais características.

Tabela 1: Tipos de Baterias.

Tipos de Baterias	ÁCIDO CHUMBO	HIDRETOS DE NÍQUEL	IÕES DE LÍTIO
Estreia Comercial	1859	1989	1991
Atual Uso Automóvel	Tradicionais Baterias de 12V	Desenvolvidas para as gerações atuais do HEV	Ainda em desenvolvimento para HEV e futuros E-CARS
Qualidade	Longamente comprovadas no automóvel	0 dobro da relação energia/peso em comparação com as baterias Ácidos Chumbo. Robustez comprovada	0 dobro da capacidade energética das NI-MH e melhor para os híbridos <i>plug-in</i> . Necessitam de menos espaço, dando maior liberdade ao projeto dos automóveis
Desvantagens	0 peso. A baixa relação energia/peso tornam-nas inviáveis para a utilização em PEV	Custo elevado (quatro vezes mais que as de Ácido Chumbo). Potencial limitado para futuro desenvolvimento	Embora já aprovadas em pequeno aparelhos, têm ainda de ser mais desenvolvidas para aplicação no automóvel. Muito caras, até haver produção em grandes volumes.
Energia Específica [Wh/Kg]	30-40	65-70	100-150
Reciclagem	Excelente	Boa	Muito Boa

Extraído e Adaptado de: (BRAGA, 2010)

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 (MORGADO, 2013). De acordo com (ANDERSON; ANDERSON, 2010), 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) Em 1912, com a invenção da partida elétrica 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 (SPERLING, 1994).

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.

Um VE é constituído por uma bateria, um motor elétrico e um controlador. A bateria realiza o armazenamento da energia utilizada pelo motor para ativar as rodas, ocasionando na transformação de energia elétrica em mecânica. A função do controlador é regular o fluxo de energia enviado ao motor, ou seja, controlar a velocidade do carro e também controlar o sentido de direção, para frente ou para trás (LEITMAN; BRANT, 2009) (JAMES; JOHN, 2003). A Figura 3 ilustra como esses elementos se conectam.



Figura 3: Diagrama Veículo Elétrico.
Extraído e Adaptado de: (LEITMAN; BRANT, 2009)

Avanços estão sendo realizados neste segmento automobilístico, como pode ser observado na Figura 4, o carro elétrico i3 da BMW.



Figura 4: Carro Elétrico i3 da BMW.
Extraído de: (BMW, 2014)

A montadora General Motors (GM) lançou o Volt (Figura 5), na categoria de carros elétricos. Outras montadoras também estão apostando nos VE como: Ford, Nissan, Renault entre outras, proporcionando estudos e pesquisas para o desenvolvimento dos VEs.



Figura 5: Carro Elétrico Volt da GM.
Extraído de: (GM, 2014)

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, vai percorrer cidades importantes como Londres, Pequim e Miami. Na primeira temporada a competição conta 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 (FIA, 2014). Na Figura 6 é ilustrado um veículo elétrico utilizado na Formula-e.



Figura 6: Veículo Elétrico Utilizado na Formula-e.
Extraído de: (FIA, 2014)

2.5 VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS

A propulsão nos veículos puramente elétricos é realizada exclusivamente por motores elétricos. Contudo, é comum classificar veículos elétricos híbridos (VEH) como um tipo de VE (FERREIRA, 2007). Os primeiros VEH surgiram para compensar a baixa eficiência das baterias utilizadas nos veículos puramente elétricos e a falta de estrutura para a distribuição de energia elétrica no início do século XX (BARAN; LEGEY, 2010).

As emissões lançadas pelos automóveis híbridos estão diretamente relacionadas com as fontes de energia utilizadas para carregar sua bateria. No caso do Brasil, em que cerca de 90% da energia elétrica consumida é gerada a partir da hidroeletricidade, as emissões se restringem aos momentos em que o motor de combustão interna for acionado (BARAN, 2012).

Segundo Hoyer (2008), existem registros da produção de VEH em 1903, quando foi desenvolvido um automóvel que apresentava as características de um VEH em série, que era composto por um Motor de Combustão Interna (MCI) acoplado a um gerador elétrico e uma bateria que alimentava dois motores elétricos que estavam acoplados às rodas dianteiras. O MCI era utilizado para fornecer tração para as rodas, bem

como para carregar uma bateria e o motor elétrico fornecia potência extra para o MCI, ou funcionava sozinho quando o veículo se encontrava em trânsito lento. Os VEHs tinham como objetivo compensar a baixa eficiência dos veículos puramente elétricos e a ineficiente estrutura para a distribuição de energia elétrica das cidades no início do século XX.

OS VEH são aqueles que além do motor movido a combustível fóssil, também possui um motor elétrico para ajudar melhorar a eficiência energética do veículo, geralmente sua bateria é recarregada através da frenagem regenerativa (transforma a energia gerada na frenagem em energia elétrica). Tendo como principal objetivo economia de combustível fóssil e diminuição da emissão de gases de efeito estufa (ABVE, 2014) (MOREIRA et al., 2008).

Existem duas configurações básicas para um VEH, a em série, no qual somente os motores elétricos acionam diretamente as rodas, e a paralela, na qual o MCI através de um sistema de engrenagem paralelo também colabora no acionamento direto das rodas (ABVE, 2014). A Figura 7 ilustra os dois tipos de configuração de VEH.

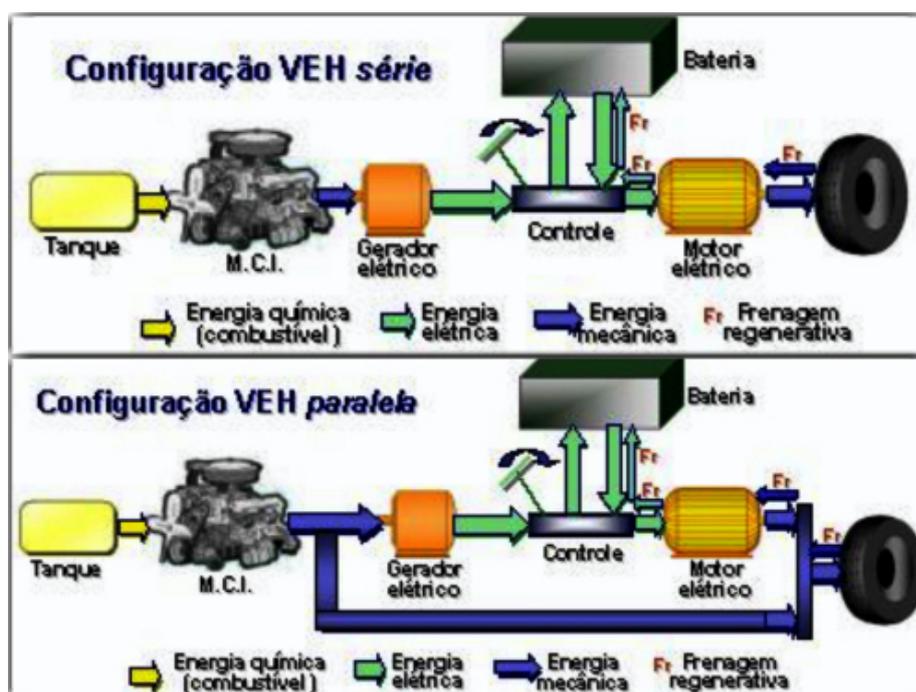


Figura 7: Configurações Básicas de um VEH.
Extraído de: (ABVE, 2014)

Os VEH não são ZE, a emissão de poluentes causado por este tipo de veículo restringem-se ao tempo em que o motor de combustão interna estiver sendo utilizado (BARAN, 2012). Existem alguns VEH

disponíveis no mercado, a Figura 8 (a) ilustra o novo modelo que está sendo comercializado pela montadora Honda, na Figura 8 (b) é ilustrado o atual modelo do veículo híbrido da montadora Toyota.



(a)

Extraído de: (HONDA, 2014)



(b)

Extraído de: (TOYOTA, 2014)

Figura 8: Exemplos de Veículos Elétricos Híbridos (a) Honda Jazz. (b) Toyota Prius.

Tanto os VEs como os VEHS utilizam motores elétricos para o seu funcionamento, estes motores podem ser de corrente contínua ou de corrente alternada. O funcionamento desses motores é descrito em detalhes na Seção 2.6.

2.6 MOTORES ELÉTRICOS

Os motores elétricos dividem-se em Motores Elétricos de Corrente Contínua e Motores Elétricos de Corrente Alternada. Na Seção 2.6.1 e 2.6.2, respectivamente, serão descritos e exemplificados cada um desses motores.

2.6.1 Motores de corrente Contínua

Os motores de corrente contínua (MCC) são dispositivos que operam aproveitando as forças de atração e repulsão geradas por eletroímã (precisam de uma carga elétrica para se tornar imã) e imãs permanentes (atraem outros metais sem precisar de eletricidade).

A ideia do MCC é ter uma bobina entre os polos dos imãs permanentes, partindo do princípio que os opostos se atraem e os iguais se repelem. O rotor é posicionado com os imãs se repelindo, gerando assim

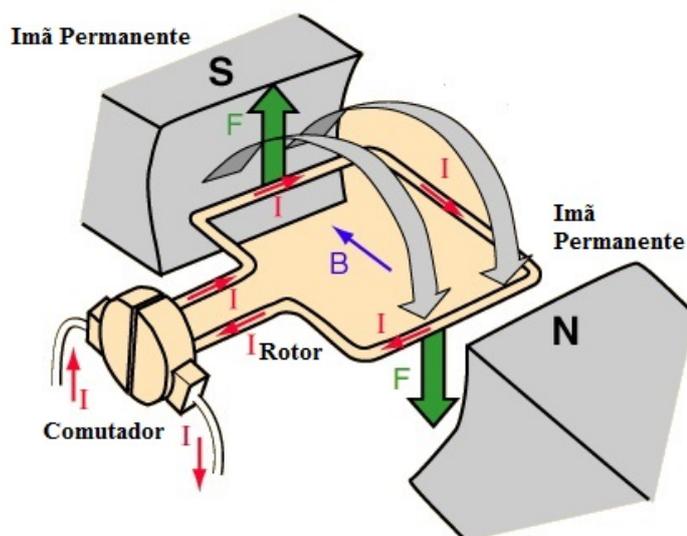


Figura 9: Motor de corrente contínua.
 Extraído e Adaptado de: (HYPERPHYSICS, 2014)

a força de repulsão (MORGADO, 2013). A Figura 9 ilustra o esquema de um motor de corrente contínua.

A intenção é que o polo norte se aproxime do polo sul dando meia volta, mas no eixo do rotor por onde passa a corrente que circula pela bobina, existe um comutador que é responsável por inverter o sentido da circulação da corrente na bobina, fazendo com que os polos se invertam e gerando assim um giro contínuo.

O resultado obtido através da força da atração em repulsão fará que o rotor não pare no ponto de equilíbrio, que seria o polo norte com o polo sul. Então, enquanto tiver corrente passando pelo rotor será gerada energia para movimentar o objeto que o motor esta controlando.

2.6.2 Motores de corrente Alternada

Os motores de corrente alternada MCA são denominados assim por serem alimentados por corrente alternada, normalmente fornecido por companhias fornecedoras de energia e são divididos em síncrono e assíncrono.

Os motores assíncronos são compostos por um estator e um rotor. O rotor pode ser de dois tipos: rotor bobinado ou rotor gaiola de esquilo, como é conhecido. O rotor gaiola de esquilo é composto por um conjunto de barras de material condutor encaixados e curto-circuitadas

por anéis metálicos nas extremidades.

O estator é o enrolado de cobre que fica fixo na carcaça do motor por onde passa a corrente para gerar o campo magnético girante que faz o rotor girar. Ele é chamado de assíncrono porque não tem sincronia devido a variação gerada pelo estator.

O rotor gira com uma velocidade n um pouco inferior à velocidade síncrona, isto é, a velocidade da corrente do campo magnético. Como é um pouco inferior, diz-se que este motor é assíncrono, isto é, sem sincronia.

Os motores assíncronos não conseguem partir da velocidade zero até a máxima, porque as forças que atuam nas barras curto-circuitadas se opõem umas às outras, impedindo o giro. Como solução é utilizado uma bobina de campo auxiliar defasada à 90 graus das bobinas de campo principais, que cria um campo magnético auxiliar na partida.

No motor síncrono o rotor possui alguns ímãs permanentes, criando pólos magnéticos ou bobinas alimentadas em corrente contínua mediante anéis coletores que fazem o rotor girar sincronizadamente. Uma vez que não existem enrolamentos no rotor, as perdas são inexistentes, fazendo com que o motor tenha um rendimento superior em relação ao motor assíncrono. A Figura 10 ilustra o rotor e o estator e como eles se unem para gerar a força eletromagnética (OLIVEIRA, 2014).

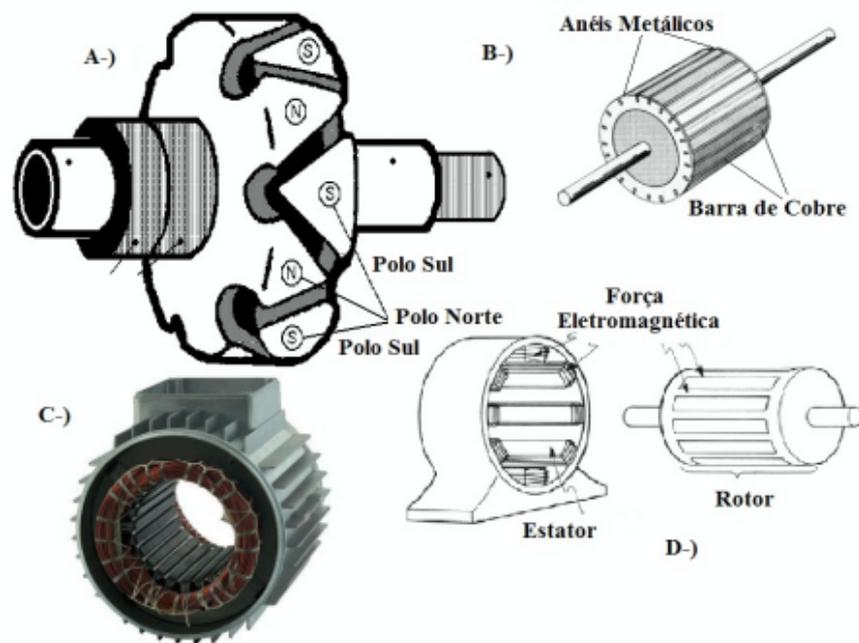


Figura 10: Os tipos de rotores e exemplo de um estator.
 A-) Rotor imã Permanente; B-) Rotor Gaiola de Esquilo;
 C-) Estator; D-) Estator com Rotor

Nos automóveis de combustão interna, além da partida elétrica, costuma-se utilizar motores elétricos para proporcionar conforto aos passageiros, como por exemplo, no sistema de refrigeração, ventilador do radiador, limpa para-brisas, bancos elétricos, vidros e travas das portas, porta-malas, ajuste nos espelhos retrovisores, etc (LEITMAN; BRANT, 2009).

3 FUNDAMENTOS DE LÓGICA FUZZY

Este capítulo apresenta um breve histórico da Lógica Fuzzy (LF). Apresenta uma introdução sobre conjuntos clássicos e surgimento dos conjuntos fuzzy. O capítulo também descreve o funcionamento dos sistemas fuzzy do tipo Mamdani e Takagi-Sugeno.

3.1 BREVE HISTÓRICO

Aristóteles (383-322 a.C.), filósofo grego considerado o pai da lógica, estabeleceu um conjunto de regras conhecida como a “lógica aristotélica”, esta não foi modificada por mais de mil anos. Para a computação os trabalhos realizados pelo matemático George Boole, dando origem a lógica Booleana, foi de suma importância para o desenvolvimento da área. Em 1903 Bertand Russel publicou um problema que não poderia ser resolvido pela lógica tradicional, ficando conhecido como o “paradoxo de Russel”, este apenas poderia ser solucionado pelo que seria conhecido mais tarde como Lógica Fuzzy (FILHO, 2004).

Em 1965 Lofti Zadeh professor da *University of California Berkeley* publicou o artigo *Fuzzy Sets* no *Journal of Information and Control*, onde foi apresentado a teoria dos conjuntos fuzzy (ZADEH, 1965). Tornando-se autoridade no assunto e disseminando o termo *Logic Fuzzy* (COX, 1994), Zadeh observou o aumento da complexidade dos sistemas e em como as variáveis estavam sendo manipulados para representarem apenas um valor, logo a lógica booleana empregada até o momento não supria mais as necessidades (ZADEH, 1973). A partir do estudo realizados por Max Black e Jan Lukasiewicz, Zadeh desenvolveu sua teoria de conjuntos *fuzzy* atribuindo variáveis linguísticas ao invés da representações matemática (COX, 1994).

3.2 CONJUNTOS CLÁSSICOS VERSUS CONJUNTOS FUZZY

Esta Seção descreve o funcionamento dos conjuntos clássicos e suas limitações, bem como o surgimento dos conjuntos fuzzy.

3.2.1 Conjuntos Clássicos

Um conjunto é qualquer arranjo que pode ser tratado como um todo. Um conjunto convencional pode ser definido pelos valores contido neles, ou seja, o valor pode ou não estar contido no conjunto. Um exemplo são os números naturais, cujo seu conjunto é formado pelos números inteiros positivos como, 1,2,3,4 etc. Números como 0.2, -1, 1.2 não pertencem ao conjunto de números naturais (COPPIN, 2010).

Em um conjunto convencional um objeto x pertence a um determinado conjunto A ($x \in A$) ou não pertence ao conjunto A ($x \notin A$), ele nunca pertencerá parcialmente a um determinado conjunto (IBRAHIM, 2004).

Por exemplo, a representação do lucro diário de uma determinada empresa por meio dos conjuntos clássicos, pode ser ruim (menor que cinco mil reais) ou bom (maior que cinco mil reais). A Figura 11 representa o conjuntos de dias onde o lucro pode ser ruim ou bom.

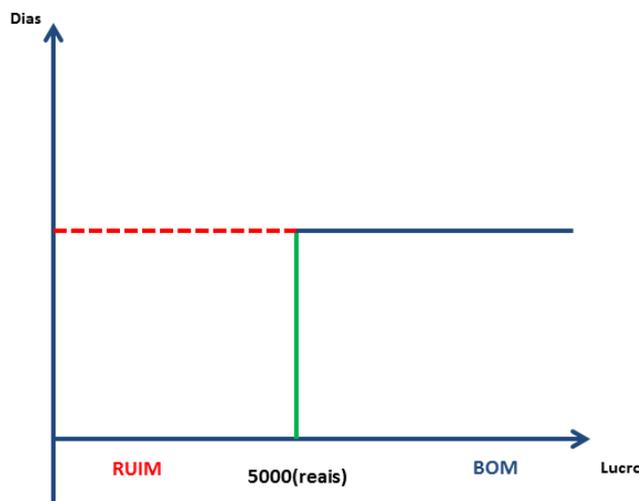


Figura 11: Exemplo de um Conjunto Clássico.

Nesse exemplo, utilizando a teoria dos conjuntos clássicos é impossível determinar que o lucro da empresa foi “quase bom” ou “pouco

ruim”. De acordo com a necessidade de trabalhar com valores imprecisos foi desenvolvido a teoria dos conjuntos fuzzy que permite avaliar os graus de verdade entre o ser e o não ser, denominados grau de pertinência (SIMÕES; SHAW, 2007). Essa teoria é descrita em detalhes na Seção 3.2.2.

3.2.2 Conjuntos Fuzzy

Conjuntos fuzzy são funções que mapeiam um valor que pode pertencer a um determinado conjunto para um número entre zero e um, indicando seu grau de pertinência. O grau zero significa que o valor não está no conjunto de valores determinado, e o grau um significa que o valor é totalmente representado nesse conjunto (COX, 1994).

Segundo Biazin (2002), os conjuntos fuzzy possibilitam a representação da aproximação do raciocínio humano, que inclui as operações utilizadas para fazer inferências em LF. Compreende-se que a LF é uma maneira de fazer a representação de processos analógicos que variam através do intervalo de valores contínuos (TERRA et al., 2002).

De acordo com (AMENDOLA; SOUZA; BARROS, 2004) um subconjunto A de um conjunto U é considerado subconjunto fuzzy de U se for descrito como um conjunto de pares ordenados como o que segue:

$$A = (x, \mu_A(x)); x \in U \mu_A(x) \in [0, 1] \quad (3.1)$$

onde, $\mu_A(x)$ é uma função de pertinência que determina com que grau x está em A .

- $\mu_A(x) = 1$, onde x pertence totalmente ao conjunto A ;
- $0 < \mu_A(x) < 1$, onde x pertence parcialmente ao conjunto A ;
- $\mu_A(x) = 0$, onde x não pertence ao conjunto A .

O exemplo citado na Seção 3.2.1 também pode ser representado utilizando a teoria dos conjuntos fuzzy, onde o lucro da empresa vai de zero (Ruim) à cinco mil reais (Ótimo). A Figura 12 ilustra o grau de pertinência do lucro de um dia da empresa com relação ao conjunto fuzzy que representa o lucro obtido.

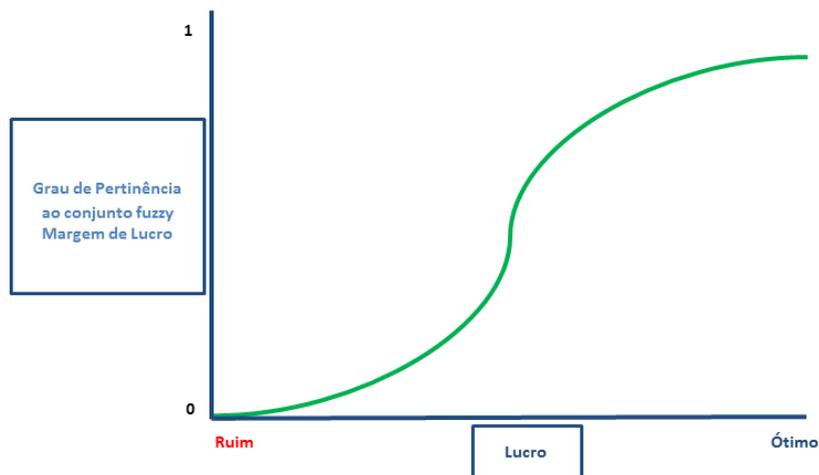


Figura 12: Função de Pertinência para o Conjunto Fuzzy que representa o Lucro Diário de uma Empresa.

Como pode ser verificado na Figura 12 quanto maior o grau de pertinência para o conjunto que representa o lucro, maior será o lucro da empresa. Portanto, o lucro da empresa é determinado conforme o grau de pertinência e não em conjuntos fixo de ruim ou bom conforme descrito na Seção 3.2.1.

3.3 RACIOCÍNIO FUZZY

A 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 (SIMÕES; SHAW, 2007). 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 (GOLDSCHIMIDT, 2010).

A LF é composta por 3 (três) operações básicas, Fuzzificação, Inferência e Defuzzificação. Segundo Camponogara (2006), 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 13 ilustra esse processo.

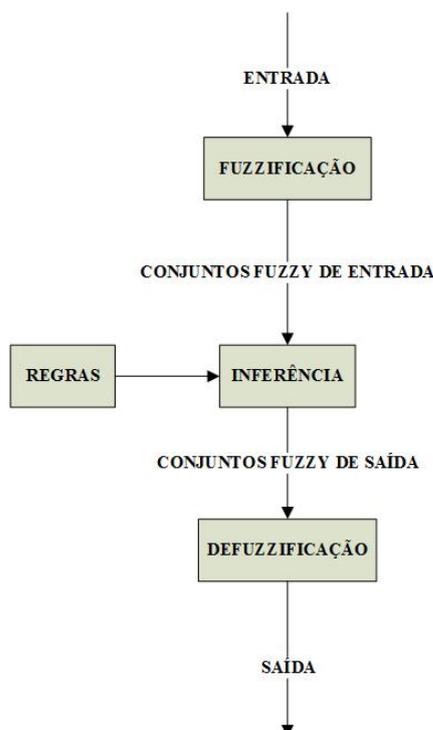


Figura 13: Operações básicas da Lógica Fuzzy.
Extraído e Adaptado de: (SILVA, 2007)

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 “acive” e a velocidade em “devagar”, “normal” e “rápido”.

Segundo Sivanandam et al. (2007), 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** acive
ENTÃO velocidade de saída **É** rápido

Neste caso, o sistema percebe que a superfície é um aclave 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 (TERRA et al., 2002) (SIMÕES; SHAW, 2007).

3.4 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

Um conjunto fuzzy possui funções de pertinência que determinam o quanto um elemento pertence a este conjunto (AMENDOLA; SOUZA; BARROS, 2004). A função é representada pela Equação 3.2, onde 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 (GOLDSCHMIDT, 2010).

$$\mu_A : x \longrightarrow [0, 1] \quad (3.2)$$

Segundo Gupta et al.,(2003), 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 14. O eixo Y do gráfico representa o grau de pertinência e o eixo X representa o universo de discurso.

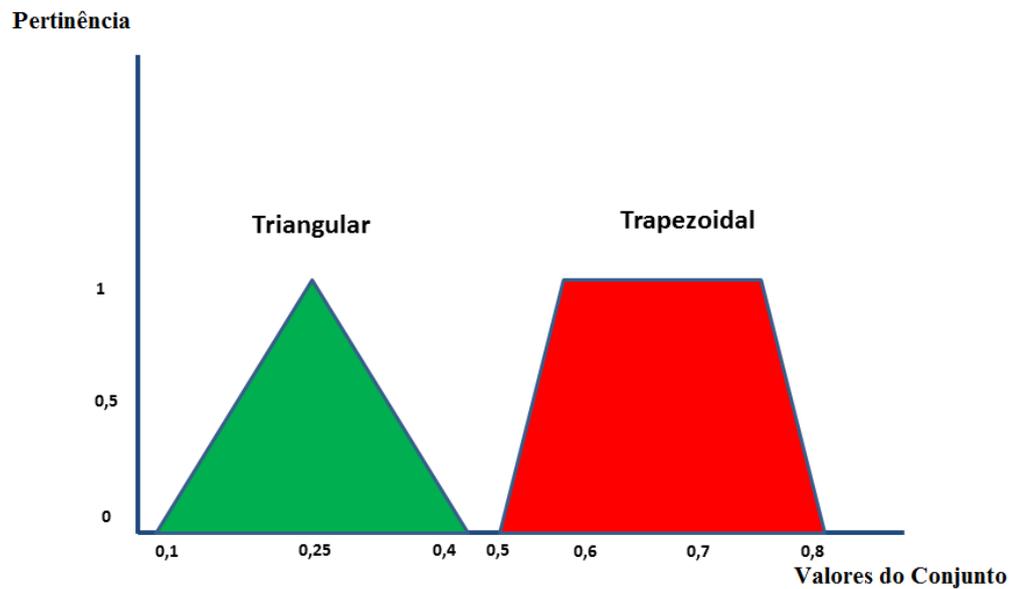


Figura 14: Função Triangular e Função Trapezoidal.

A função de pertinência triangular possui três valores escalares (a, b, c) que indicam apenas um ponto máximo de valores, conforme Equação 3.3.

$$f(x : a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (3.3)$$

A função de pertinência trapezoidal possui quatro valores (a, b, c, d), onde é possível representar todo um intervalo de pontos de máximo (BIAZIN, 2002). A Equação 3.4 representa a função de pertinência trapezoidal (VAZ, 2006).

$$f(x : a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \leq c \\ 0, & x > d \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d \end{cases} \quad (3.4)$$

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 3.5 é descrito em detalhes os métodos de defuzzificação conhecido como Centróide (Centro da Massa) e Média dos Máximos.

3.5 MÉTODOS DE DEFUZZIFICAÇÃO

Os resultados de todas as regras inferidas são defuzzificados para valores reais por meio de um método de defuzzificação (CAMPOGARA, 2006). Existem vários métodos que podem ser utilizados na teoria, este trabalho abordará os dois mais utilizados, descrito em detalhes na Seção 3.5.1 e na Seção 3.5.2.

3.5.1 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 (SIMÕES; SHAW, 2007).

A Equação 3.5 representa como é definido o centro de gravidade (COPPIN, 2010).

$$C = \frac{\sum P_A(x)x}{\sum P_A(x)} \quad (3.5)$$

Analisando a Equação 3.5 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.

3.5.2 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 feita uma média entre os valores encontrados (KOHAGURA, 2007). Este resultado é calculado pela Equação 3.6.

$$u = \sum_{m=1}^M \frac{u_m}{M} \quad (3.6)$$

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 3.5.3 são apresentados dois tipos mais utilizados.

3.5.3 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 (COX, 1994).

Segundo Sugeno (1985), 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 Andrade e Jacques (2008), os sistemas 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 (R_i) 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 é 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 3.5) para processar o valor real de saída.

Na década de 80 foi proposta uma estrutura também baseada na teoria dos conjuntos fuzzy (SUGENO, 1985). Segundo RABÊLO et al. (2011) 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 (ALMEIDA; EVSUKOFF, 2003). A Equação 3.7 ilustra uma regra comum do modelo Takagi-Sugeno.

$$\text{se } x_1 = A_i \text{ e } x_2 = A_j \text{ e } \dots \text{ e } x_p = A_m \text{ então } y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_p) \quad (3.7)$$

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 Mandami, 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 4.2.1 do próximo Capítulo.

4 ARQUITETURA DE CONTROLE PROPOSTA

Este capítulo descreve em detalhes a arquitetura de controle fuzzy desenvolvida para um veículo elétrico, descrevendo também o protótipo de um veículo elétrico desenvolvido e utilizado para testar a arquitetura de controle proposta.

4.1 CARACTERÍSTICAS DA ARQUITETURA PROPOSTA

A arquitetura de controle ideal para o veículo elétrico proposta neste trabalho está ilustrada na Figura 15. 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.

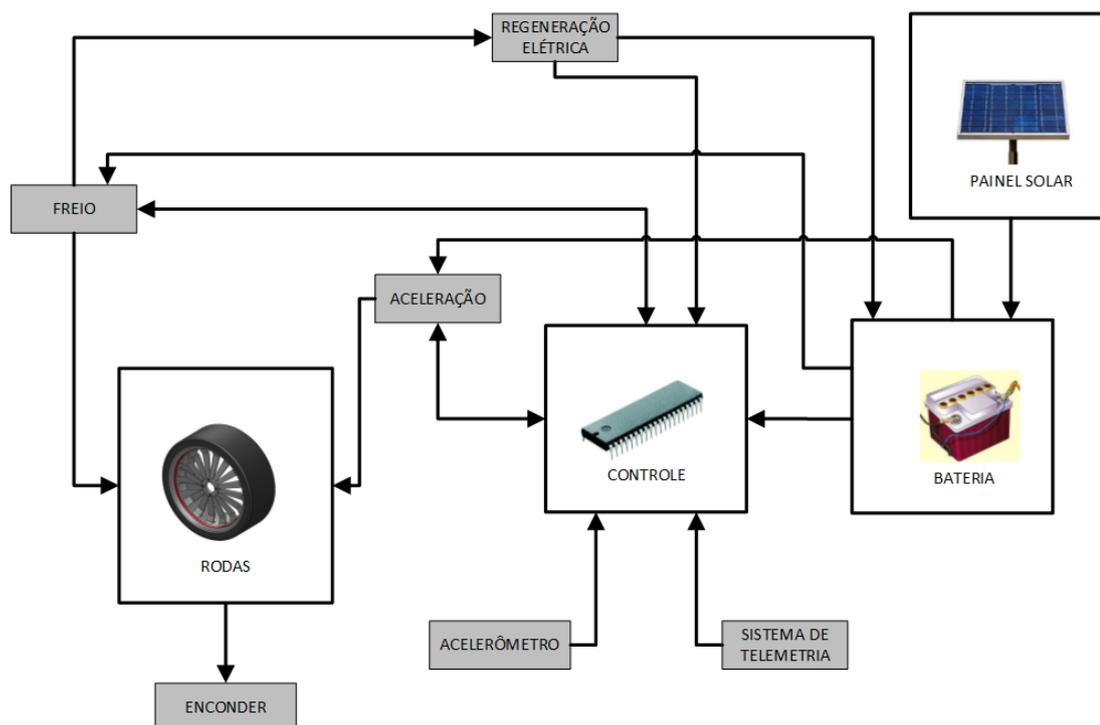


Figura 15: Arquitetura de Controle Proposta.

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 16, 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 5.

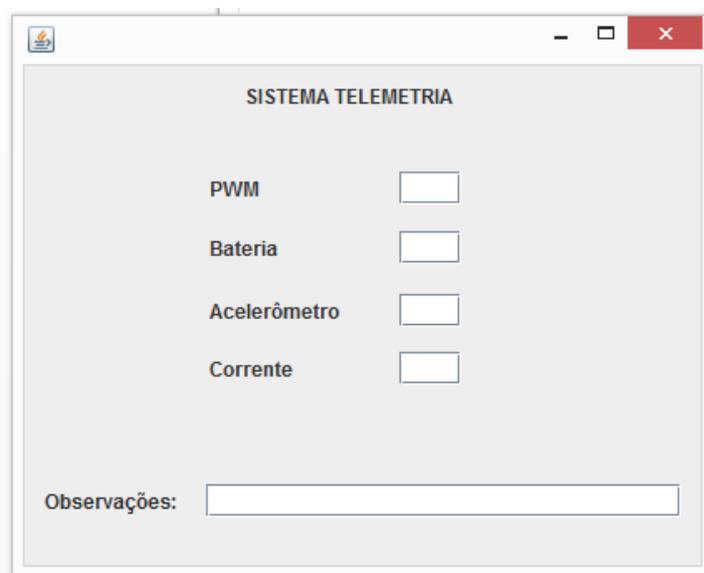


Figura 16: Interface do Sistema de Telemetria.

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) (ALVES, 2014). 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 (MILHOR, 2002), 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 4.2.1.

4.2 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 17 ilustra o protótipo construído que foi utilizado para realizar os testes nos três cenários propostos.

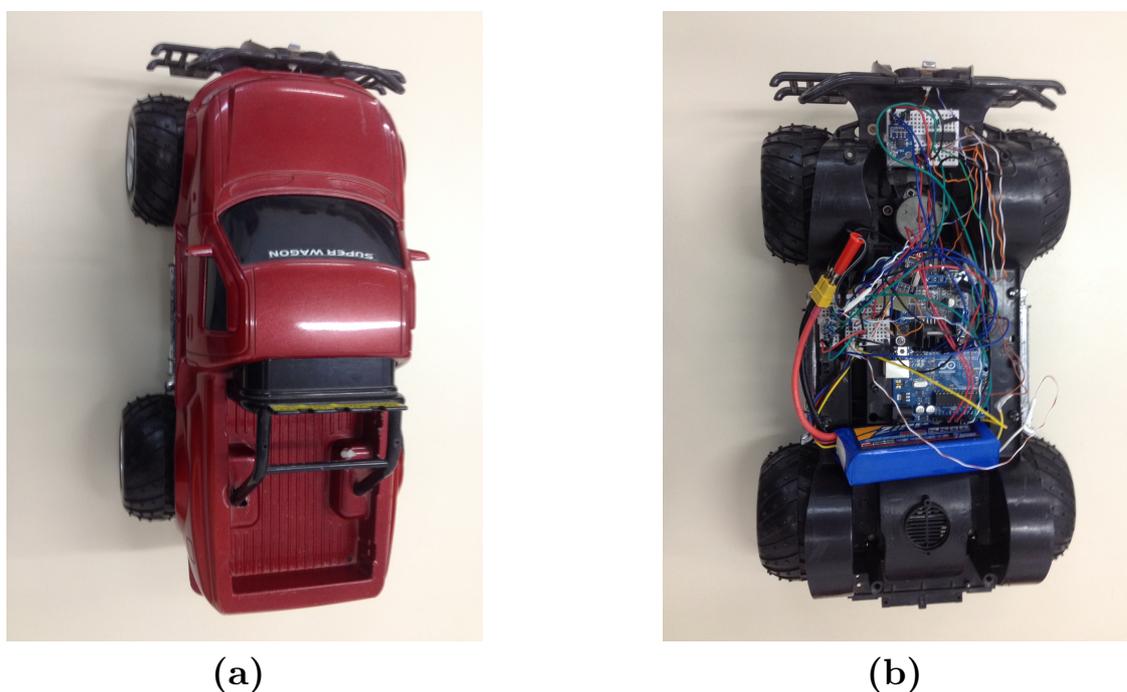


Figura 17: Protótipo Construído. (a) visão externa. (b) visão interna com a placa de controle.

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 (BORGONOVO, 2005) (BANZI, 2011).

4.2.1 Sistema de Controle Fuzzy

Com a utilização da Lógica Fuzzy (LF) no sistema de controle, foi possível determinar valores intermediários entre a superfície plana, declive e aclave, tais como: pouco declive e pouco aclave. Para a realização dos experimentos foi necessário calibrar o acelerômetro do seguinte modo. Quando o VE encontra-se em uma superfície plana o valor obtido na saída do acelerômetro está entre 2° e 8° , em uma superfície de pouco aclave quando o valor obtido na saída do acelerômetro está entre 6° e 15° , em uma superfície de aclave quando o valor obtido na saída do acelerômetro está entre 12° e 70° , em uma superfície pouco declive quando o valor obtido na saída do acelerômetro esta entre -10° e 4° e em uma superfície de declive quando o valor do acelerômetro está entre -70° e -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 2.

Tabela 2: 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 (conjuntos ilustrados na Seção

A.1 do Apêndice A), que 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 18.

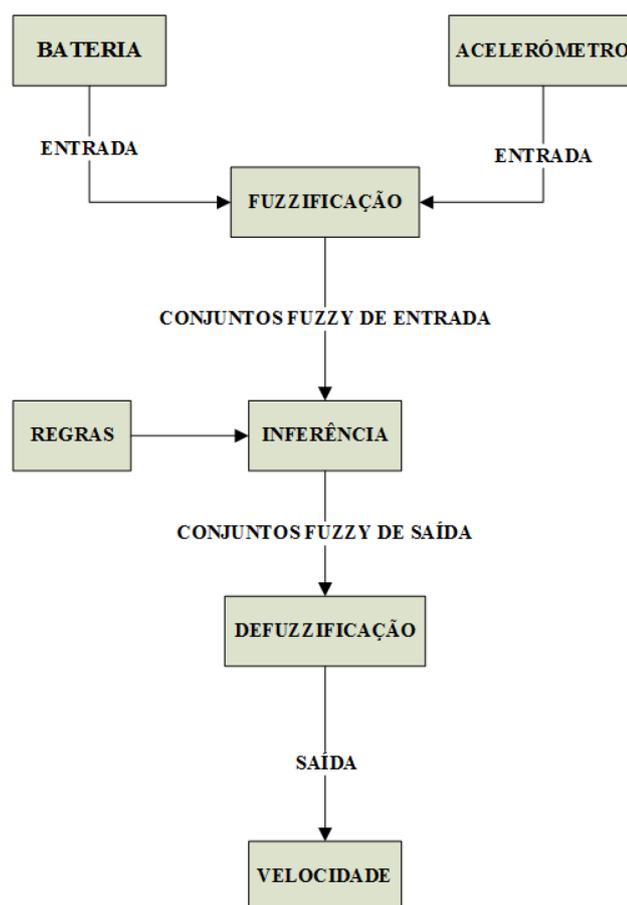


Figura 18: Diagrama do Processo de Inferência Fuzzy.
Extraído e Adaptado de: (SILVA, 2007)

O conjunto de regras (descritas na Seção A.2 do Apêndice A) presente no processo de inferência do SCF foram elaboradas e testadas com base na Figura 19. Utilizando a ferramenta *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB foi possível testar e validar as regras.

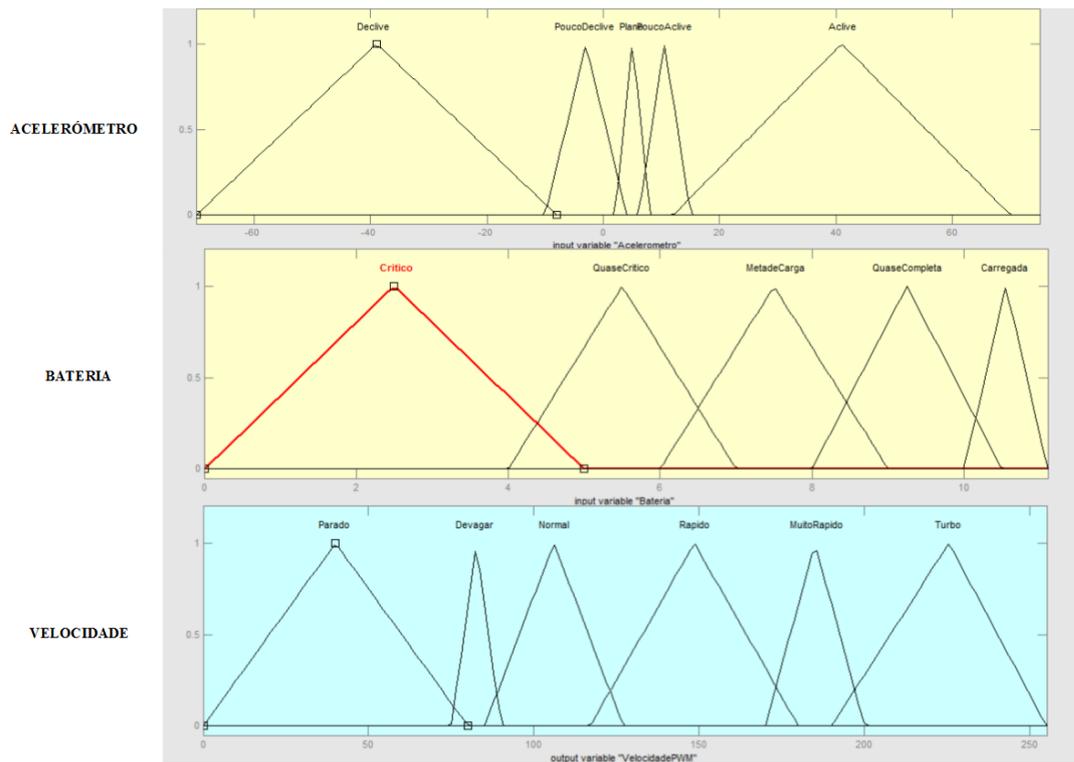


Figura 19: Modelagem das variáveis de entrada e de saída no MATLAB.

Como pode ser visualizado na Figura 19 foi utilizado a função de pertinência triangular para modelar os conjuntos fuzzy do sistema proposto. O funcionamento dessa função é descrito em detalhes na Seção 3.4 do Capítulo 3.

5 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da avaliação do Sistema de Controle Fuzzy (SCF) comparado com um Sistema de Controle *If-Else* (SIF).

5.1 METODOLOGIA EMPREGADA NOS EXPERIMENTOS

Para realizar os experimentos foram considerados três cenários: plano, aclave e declive. O aclave 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.

5.1.1 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 aclave. 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 aclave (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 5.1.2 descreve os resultados obtidos no Aclive; a Seção 5.1.3 descreve os resultados obtidos no Declive e na Seção 5.1.4 são descritos os resultados obtidos no Plano.

5.1.2 Cenário 1: Aclive

Neste experimento foi utilizado um ambiente de testes com 7,8 metros com aproximadamente 5° de inclinação. A Figura 20 ilustra este ambiente.



Figura 20: Ambiente de Testes para o Experimento Aclive.

A Figura 21 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, 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 21.

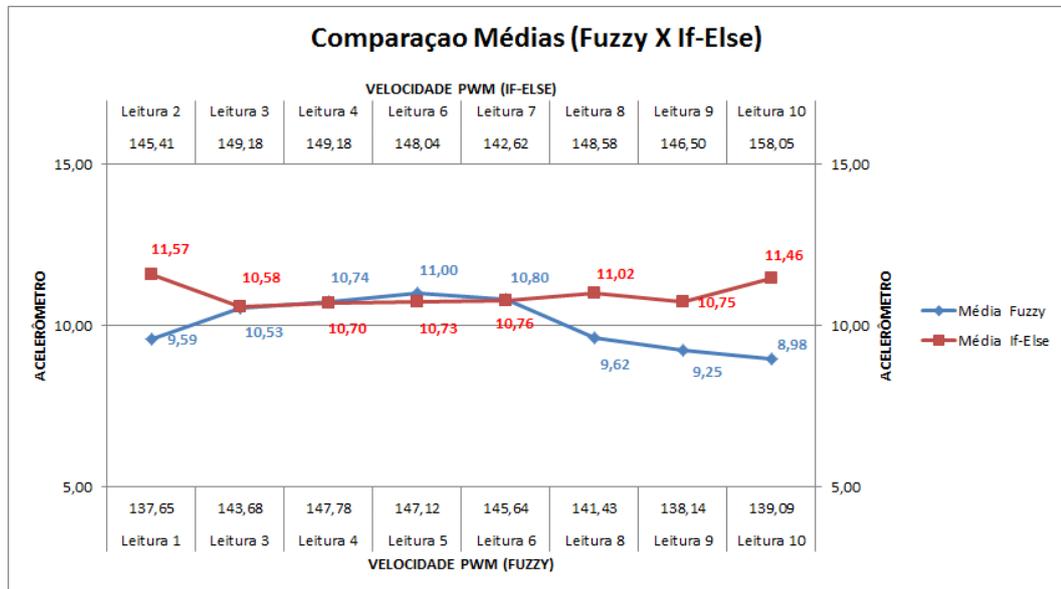


Figura 21: Médias da Velocidade PWM entre o SCF e o SIF.

O gráfico da Figura 22 apresenta a média da corrente consumida por ambos os sistemas. É possível observar que o SCF obteve melhores resultados em praticamente todas as leituras.

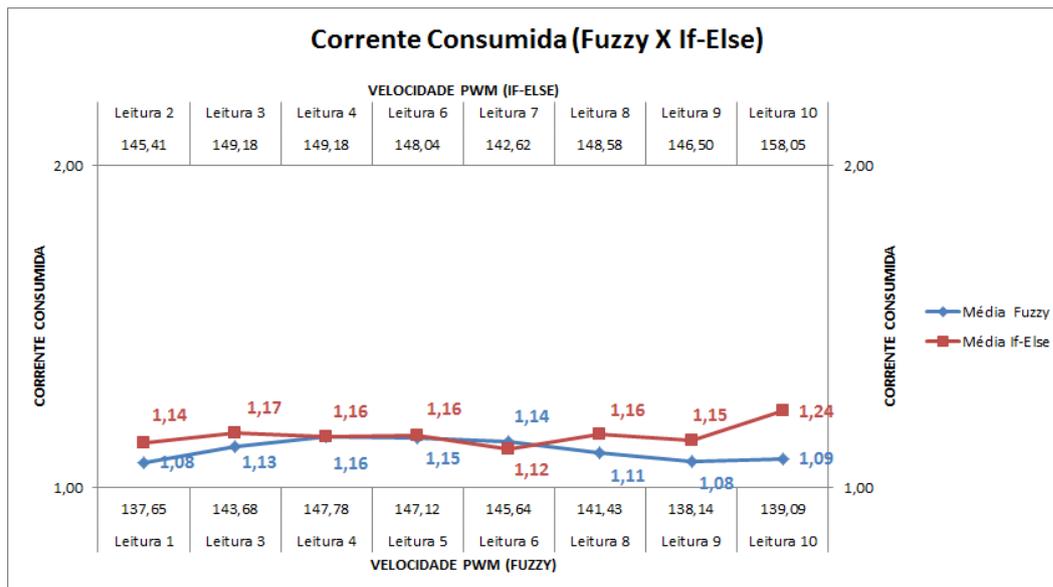


Figura 22: Médias da Corrente Consumida entre o SCF e o SIF.

A Figura 23 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 SCF foi de 1,158.

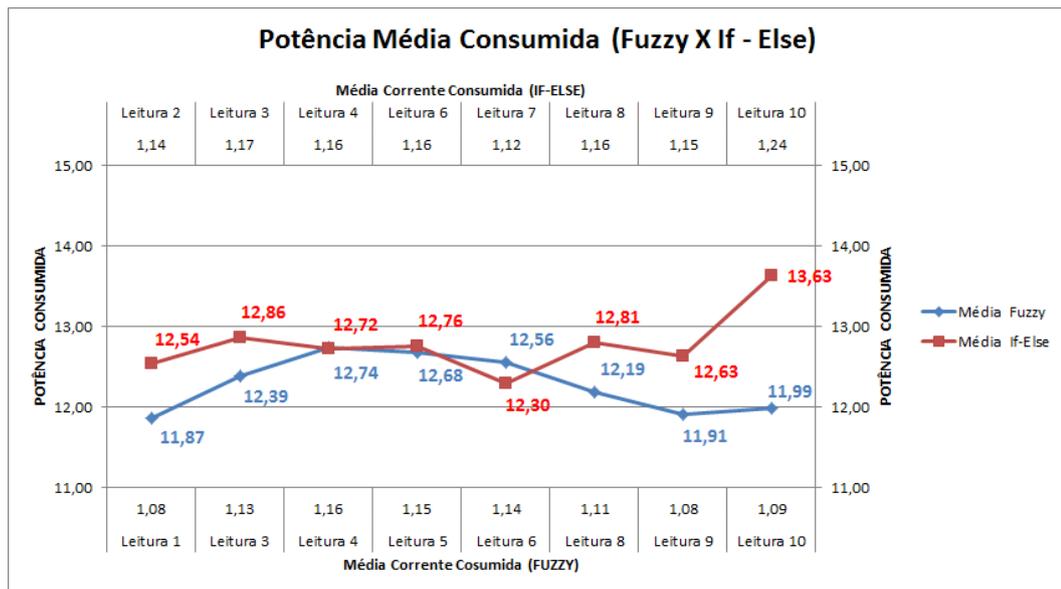


Figura 23: Médias da Potência Consumida entre o SCF e o SIF

A série completa dos dados obtidos nos experimentos realizados no aclave são apresentados em detalhes na Seção A.3.1 do Apêndice A.

5.1.3 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 24 ilustra o ambiente.



Figura 24: Ambiente de Testes para o Experimento Declive.

O gráfico ilustrado na Figura 25 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 25.

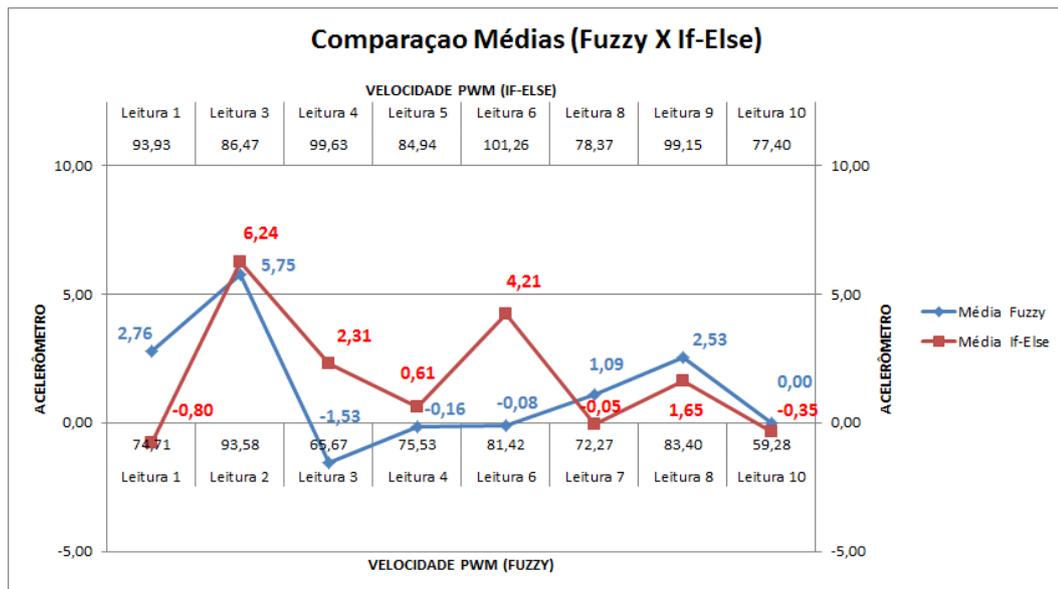


Figura 25: Médias das Velocidade PWM entre o SCF e o SIF.

A corrente consumida por ambos os sistemas é ilustrada no gráfico da Figura 26. É possível observar que o SCF consumiu menos corrente do que o sistema SIF.

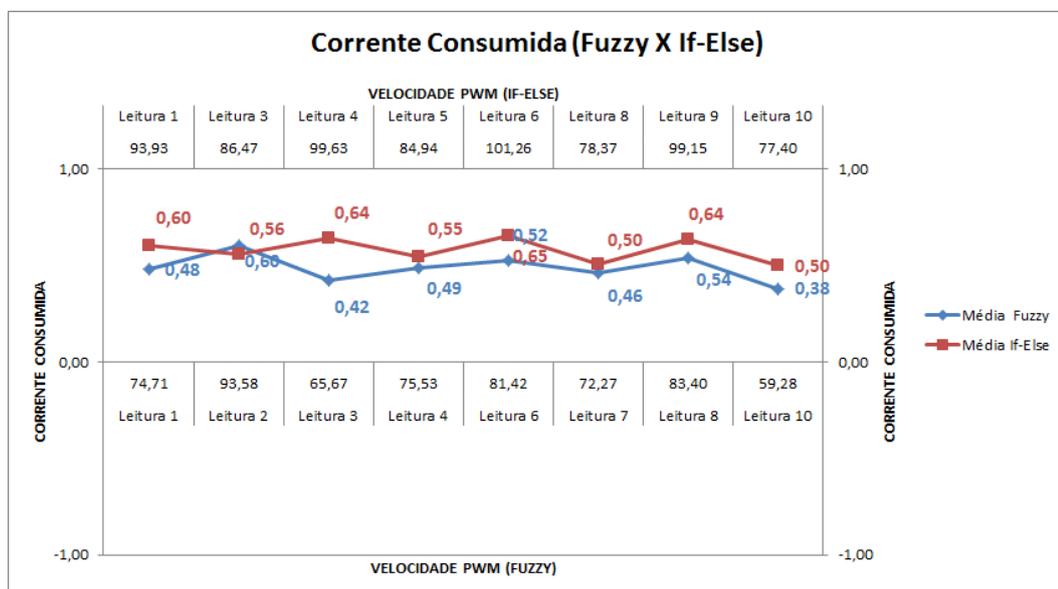


Figura 26: Médias da Corrente Consumida entre o SCF e o SIF.

O gráfico ilustrado na Figura 27 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.

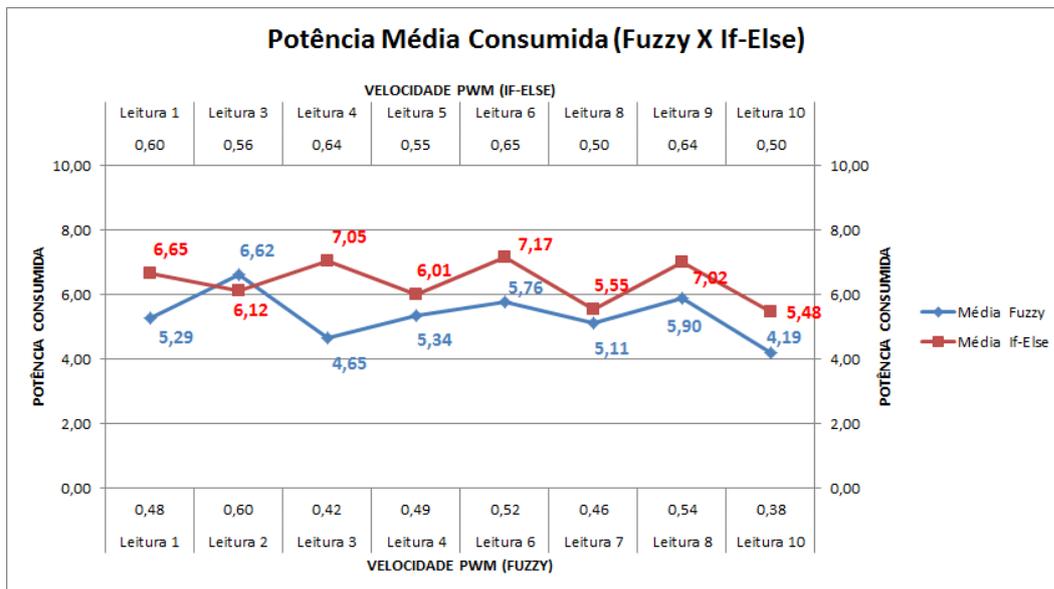


Figura 27: Médias da Potencia Consumida entre o SCF e o SIF.

A série completa dos dados obtidos nos experimentos realizados no declive são apresentados em detalhes na Seção A.3.1 do Apêndice A.

5.1.4 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 28.



Figura 28: Ambiente de Testes para o Experimento Plano.

Como pode ser visualizado na Figura 29, 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 aclive 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 aclive, por isso inferiu a regra equivalente para este tipo de ambiente, conseqüentemente a média da velocidade PWM foi maior para este sistema.

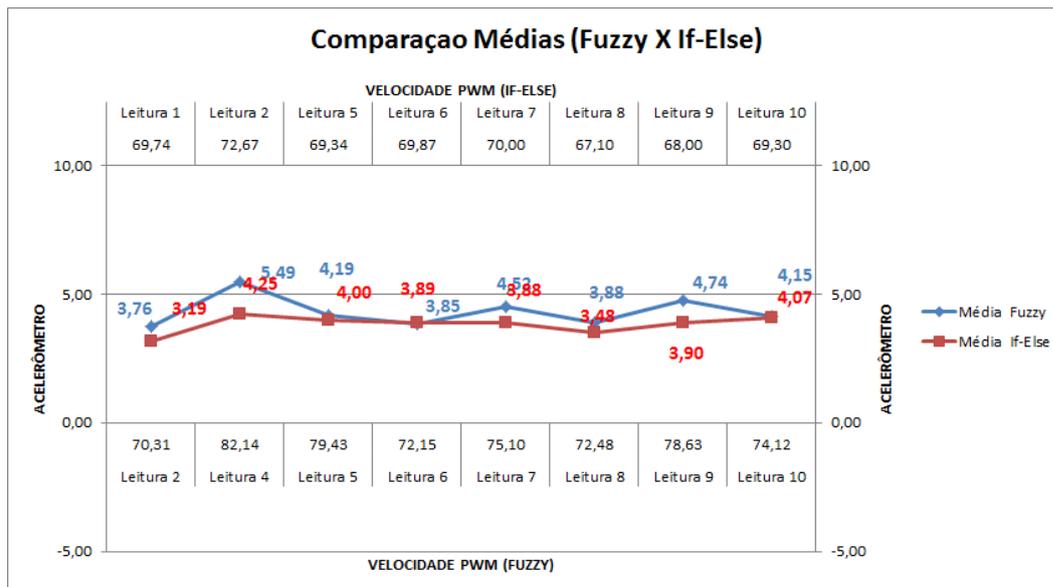


Figura 29: Médias da Velocidade PWM entre o SCF e o SIF.

A corrente consumida por ambos os sistemas é ilustrada no gráfico da Figura 30. 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.

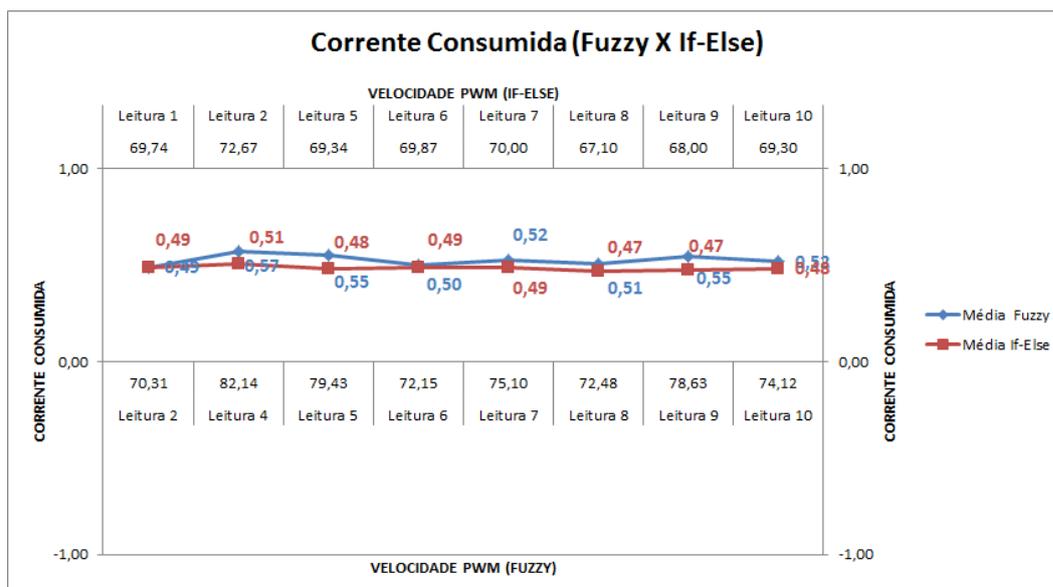


Figura 30: Médias da Corrente Consumida entre o SCF e o SIF.

No gráfico ilustrado na Figura 31 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.

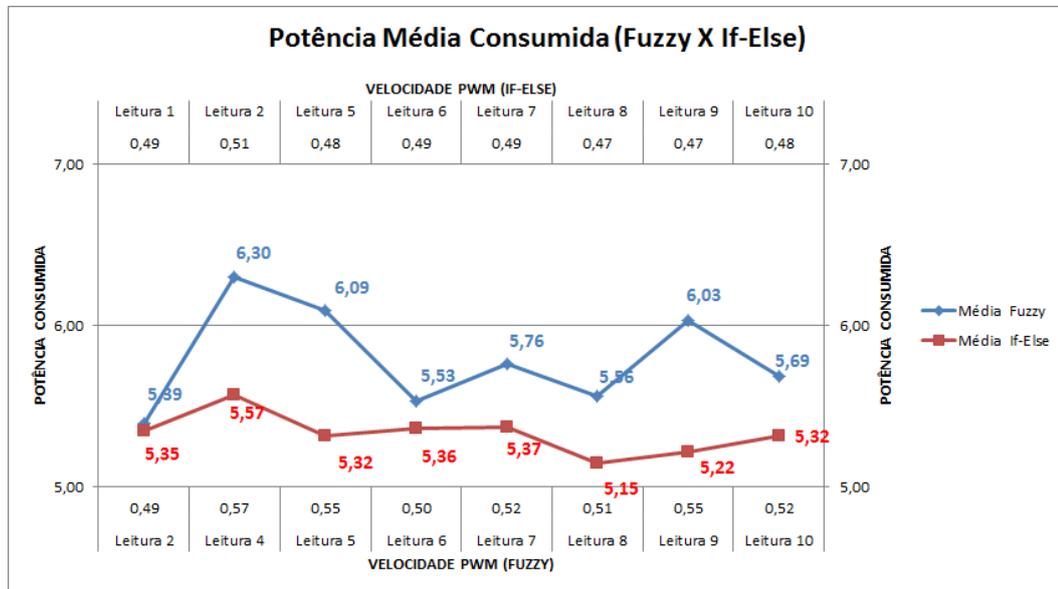


Figura 31: Médias da Potência Consumida entre o SCF e o SIF.

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.

A série completa dos dados obtidos nos experimentos realizados em superfície plana são apresentados em detalhes na Seção A.3.1 do Apêndice A.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo apresenta as considerações finais e algumas propostas para trabalhos futuros.

6.1 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, mas as baterias, responsáveis por armazenar a carga elétrica, são formadas por materiais poluentes para o meio ambiente.

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 aclive, 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 conseqüentemente 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 conseqüentemente, a potência consumida nos ambientes de aclive 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.

6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta seção são listadas algumas propostas para trabalhos futuros que visam melhorar e/ou estender o trabalho desenvolvido neste TCC.

1. Implementar o sistema de controle fuzzy em um veículo elétrico real;
2. Comparar o sistema de controle fuzzy com um sistema de controle clássico do tipo PID (*Proporcional-Integral-Derivativo*);
3. Comparar o sistema de controle fuzzy com um sistema de controle baseado em redes neurais artificiais;
4. Comparar o sistema de controle fuzzy com um sistema de controle neurofuzzy.

REFERÊNCIAS

- ABVE, A. B. d. V. E. *O que é um veículo híbrido?* 2014. Disponível em: <http://www.abve.org.br/PF/ExibePF.asp?codigo=0003> Acessado em: 18 de Novembro de 2014.
- ALMEIDA, P. E. M. d.; EVSUKOFF, A. G. Sistemas fuzzy. *Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações, 1^a Ed. São Paulo: Manole*, p. 89–114, 2003.
- ALVES, A. J. efl - biblioteca fuzzy em c++. Disponível em: <http://zerokol.com/post/51e9324ee84c55a1f5000007/1/pt-BR> Acessado em: 26 de novembro de 2014, 2014.
- AMARAL, E. G. do. Veículo elétrico com sistema energético híbrido: Célula de combustível/baterias eletroquímicas. Biblioteca Digital da Unicamp, 1998.
- AMBIENTE, S. S. E. do M. Plano de controle da poluição por veículos em uso - pcpv. 2011.
- AMENDOLA, M.; SOUZA, A.; BARROS, L. C. Manual do uso da teoria dos conjuntos fuzzy no matlab 6.5. *Campinas: CPG/FEAGRI/UNICAMP*, 2004.
- ANDERSON, C. D.; ANDERSON, J. *Electric and hybrid cars: A history*. 2. ed. [S.l.]: McFarland, 2010.
- ANDRADE, M.; JACQUES, M. A. P. Estudo comparativo de controladores mamdani e sugeno para controle de tráfego em interseções isoladas. *Revista Transportes*, v. 16, n. 2, 2008.
- BANZI, M. *Primeiros passos com o Arduino*. [S.l.]: Novatec Editora, 2011.
- BARAN, R. *A Introdução de Veículos Elétricos no Brasil: Avaliação do Impacto no Consumo de Gasolina e Eletricidade*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no brasil. 2010.
- BIAZIN, A. Um modelo de integração de lógica fuzzy a banco de dados convencionais. 2002.

BMW. *BMW i3 Born Electric*. 2014. Disponível em: <http://www.novobmwi.com.br/index.html> Acessado em: 18 de Novembro de 2014.

BORGONOVO, D. *Análise Modelagem e Controle de Retificadores PWM Trifásicos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis-SC, Junho 2005.

BRAGA, J. R. B. d. C. *Integração de veículos eléctricos no sistema eléctrico nacional*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2010.

CAMPOGARA, E. *Introdução a inteligência computacional*. Universidade Federal de Santa Catarina: Departamento de Automação e Sistemas, Santa Catarina, Brasil, Documentation, 2006.

CAPELLI, A. *Eletroeletrônica Automotiva: Injeção Eletrônica, Arquitetura do Motor e Sistemas Embarcados*. [S.l.: s.n.], 2012.

CNT, C. N. d. T. *A fase P7 do Proconve e o impacto no setor de transporte*. 2012. Programa Despoluir. Sest/Senat, 2012.

CONAMA, C. N. d. M. A. *RESOLUÇÃO CONAMA Nº 18, de 6 de maio de 1986*. 1986. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res1886.html> Acessado em: 03 de Maio de 2014. D.O.U de 17/6/86.

COPPIN, B. *Inteligência artificial/ben coppin; tradução e revisão técnica jorge duarte pires valério*. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

COX, E. *The fuzzy systems handbook: a practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems*. [S.l.]: AP Professional, 1994.

DUTTON, K. *A brief history of the car*. NEW IDEAS, 2006.

FERREIRA, A. A. *Sistema supervisorio de gestão de múltiplas fontes de suprimento para aplicações em veículos eléctricos*. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

FIA. *Formula-e Championship*. 2014. Disponível em: <http://www.fiaformulae.com/en/guide/overview.aspx> Acessado em: 18 de Novembro de 2014.

FILHO, P. C. *Método para apoio à decisão na verificação da sustentabilidade de uma unidade de conservação, usando lógica fuzzy*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação de Engenharia de Produção, 2004.

GAMMARIELLO, R.; CARLOCK, M. California air resources board. 1997.

GM, G. M. *Volt 2015*. 2014. Disponível em: <http://www.chevrolet.com/volt-electric-car/exterior-pictures.html>
Acessado em: 18 de Novembro de 2014.

GOLDEMBERG, J. World energy assessment: Energy and the challenge of sustainability. *United Nations Pubns, 2000. ISBN 9211261260.*, 2000.

GOLDSCHIMIDT, R. R. *Uma Introdução à Inteligência Computacional: fundamentos, ferramentas e aplicações*. [S.l.]: Série de Livros Didáticos Digitais, Instituto Superior de Tecnologia do Rio de Janeiro, 2010.

HONDA. *Honda Jazz*. Novembro 2014. Disponível em: <http://www.honda.pt/cars/new/jazz-2013/performance.html>
Acessado em: 12 de Novembro de 2014.

HOYER, K. G. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. *Utilities Policy*, Elsevier, v. 16, n. 2, p. 63–71, 2008.

HYPERPHYSICS. *DC Motor Operation*. 2014. Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/motdc.html>
Acessado em: 09 de Maio de 2014.

IBAMA. Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores - proconve/promot. *Brasília: IBAMA: 584 p.*, 2011.

IBRAHIM, A. *Fuzzy logic for embedded systems applications*. [S.l.]: Newnes, 2004.

JAMES, L.; JOHN, L. *Electric vehicle technology explained*. [S.l.]: Wiley, 2003.

KOHAGURA, T. *Lógica fuzzy e suas aplicações*. *Departamento de Computação*, 2007.

- LEITMAN, S.; BRANT, B. *Build your own electric vehicle*. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2009. ISBN 0071543732., 2009.
- MARTINS, J. *Motores de Combustão Interna*. 4. ed. [S.l.]: Publindústria, 2013.
- MENDES, F. E. *Avaliação de programas de controle de poluição atmosférica por veículos leves no Brasil*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2004.
- MILHOR, C. E. *Sistema de desenvolvimento para controle eletrônico dos motores de combustão interna ciclo Otto*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2002.
- MOREIRA, J. R. et al. Veículos elétricos híbridos e a emissão de poluentes. *Universidade de São Paulo–IEE/CENBIO, Universidade Presbiteriana Mackenzie*, 2008.
- MORGADO, D. G. R. Controle de velocidade de um veículo elétrico autônomo. Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2013.
- MOTOR, M. d. - *Motor Otto - O resgate de uma era*. 2014. Disponível em: <http://www.mecanica.ufrgs.br/mmotor/otto.htm> Acessado em: 03 de Maio de 2014.
- OLIVEIRA, L. C. de. Motores elétricos. *Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Curitiba*, 2014.
- RABÊLO, R. d. A. L. et al. 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*, Scielo Brasil, v. 22, n. 1, p. 49–64, 2011.
- ROCHA, G. d. *Funcionamento do Motor Ciclo Diesel*. 2009. Disponível em: <http://www.infomotor.com.br/site/2009/11/funcionamento-do-motor-de-ciclo-diesel/> Acessado em: 03 de Maio de 2014.
- SANTOS, G. A. G. D. et al. Carro elétrico, a revolução geopolítica e econômica do século xxi e o desenvolvimento do brasil. 2009.
- SANTOS, V. Conversão de veículos convencionais em veículos elétricos. *Seminário: Mobilidade Elétrica: O Veículo*, 2010.

- SILVA, S. F. da. *Identificação de torque de carga em motores de indução usando abordagem baseada em sistemas fuzzy*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2007.
- SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. *Controle e modelagem fuzzy*. São Paulo. Blucher: Fapesp, 2007.
- SIVANANDAM, S. et al. *Introduction to fuzzy logic using MATLAB*. [S.l.]: Springer, 2007.
- SPERLING, D. Gearing up for electric cars. *University of California Transportation Center*, 1994.
- SUGENO, M. An introductory survey of fuzzy control. *Information sciences*, Elsevier, v. 36, n. 1, p. 59–83, 1985.
- TERRA, T. et al. *Aplicação de lógica fuzzy no controle de trânsito urbano*. Florianópolis-SC, 2002.
- TOYOTA. *Toyota Pirus*. Novembro 2014. Disponível em: <http://www.honda.pt/cars/new/jazz-2013/performance.html>
Acessado em: 12 de Novembro de 2014.
- VAZ, A. M. *Estudo das funções de pertinência para conjuntos fuzzy utilizados em controladores semafóricos fuzzy*. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2006.
- ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and control*, Elsevier, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.
- ZADEH, L. A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, IEEE, n. 1, p. 28–44, 1973.

**APÊNDICE A – Modelagem do Sistema de Controle Fuzzy
e Listagem dos Dados obtidos nos Experimentos Realizados**

Neste apêndice é descrito em detalhes os conjuntos fuzzy utilizado no trabalho e as regras utilizadas no processo de inferência. O apêndice também apresenta a listagem dos dados obtidos nos experimentos apresentados no Capítulo 5.

A.1 CONJUNTOS FUZZY DO SISTEMA DE CONTROLE

No sistema de controle fuzzy (SCF) desenvolvido foram utilizados conjuntos de valores para representar a superfície e a bateria. O conjunto que representa a superfície está dividido em Declive, Pouco Declive, Plano, Pouco Aclive, Aclive. Para representar a bateria o conjunto foi dividido em crítico, metade da carga, quase completa e completa. Esses conjuntos são todos triangulares e são descritos como Segue.

```

1 FuzzySet* Declive = new FuzzySet(-70, -39, -39, -8);
2 FuzzySet* PoucoDeclive = new FuzzySet(-10, -3, -3, 4);
3 FuzzySet* Plano = new FuzzySet(2, 5, 5, 8);
4 FuzzySet* PoucoAclive = new FuzzySet( 6, 10.5, 10.5, 15);
5 FuzzySet* Aclive = new FuzzySet(12, 41, 41, 70);
6
7 FuzzySet* critico = new FuzzySet(0, 3.5, 3.5, 7);
8 FuzzySet* MetadeCarga = new FuzzySet(6, 7.5, 7.5, 9);
9 FuzzySet* QuaseCompleta = new FuzzySet(8, 9.25, 9.25, 10.5);
10 FuzzySet* Completa = new FuzzySet(10, 10.55, 10.55, 11.1);

```

O conjunto desenvolvido para representar a variável de saída denominada velocidade PWM é dividido em 6 (seis) estados, como Saída Parado, Saída Devagar, Saída Normal, Saída Rápido, Saída Muito Rápido, Saída Turbo. Esses conjuntos de valores são representados abaixo.

```

1 FuzzySet* SaidaParado = new FuzzySet(0, 40, 40, 80);
2 FuzzySet* SaidaDevagar = new FuzzySet(75, 82.5, 82.5, 90);
3 FuzzySet* SaidaNormal = new FuzzySet(85, 106, 106, 127);
4 FuzzySet* SaidaRapido = new FuzzySet(117, 148.5, 148.5, 180);
5 FuzzySet* SaidaMuitoRapido = new FuzzySet(170, 185, 185, 200);
6 FuzzySet* SaidaTurbo = new FuzzySet(190, 222.5, 222.5, 255);

```

A.2 REGRAS DO SISTEMA DE CONTROLE FUZZY

O Sistema de Controle Fuzzy (SCF) desenvolvido contém 16 (dezesesseis) regras no seu processo de inferência, abaixo é descrito detalha-

damente cada uma delas.

A.2.1 Regra 1

A 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, conforme descrito nos conjuntos fuzzy na Seção A.1. Abaixo é ilustrado o código implementado.

```

1
2 // Instanciado um Antecedente para a expressao
3 FuzzyRuleAntecedent* ifBateriaCritico = new FuzzyRuleAntecedent();
4
5 ifBateriaCritico->joinSingle(critico);
6
7 // Instanciado um Consequente para a expressao
8 FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeParado = new FuzzyRuleConsequent();
9
10 // Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
11 thenVelocidadeParado->addOutput(SaidaParado);
12
13 // Instanciando um objeto FuzzyRule
14 FuzzyRule* fuzzyRegra01 = new FuzzyRule(1, ifBateriaCritico,
15 thenVelocidadeParado);
16
17 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRegra01);

```

A.2.2 Regra 2

A 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, conforme descrito nos conjuntos fuzzy na Seção A.1.

```

1
2 // Instanciado um Antecedente para a expressao
3 FuzzyRuleAntecedent* ifPlanoAndMetadeCarga = new FuzzyRuleAntecedent();
4

```

```

5  ifPlanoAndMetadeCarga->joinWithAND(Plano, MetadeCarga);
6
7  // Instanciado um Consequente para a expressao
8  FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeRapidol3 = new FuzzyRuleConsequent();
9
10 // Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
11 thenVelocidadeRapidol3->addOutput(SaidaRapido);
12
13 // Instanciando um objeto FuzzyRule
14 FuzzyRule* fuzzyRule03 = new FuzzyRule(3, ifPlanoAndMetadeCarga,
15     thenVelocidadeRapidol3);
16
17 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule03);

```

A.2.3 Regra 3

A regra 3 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 está quase completa, caso o VE se encontrar nessa situação é enviado para o motor o valor de saída correspondente ao estado Saída Devagar, conforme descrito nos conjuntos fuzzy na Seção A.1.

```

1
2 // Instanciando um Antecedente para a expressao
3 FuzzyRuleAntecedent* ifPlanoAndQuaseCompleta = new FuzzyRuleAntecedent();
4
5 ifPlanoAndQuaseCompleta->joinWithAND(Plano, QuaseCompleta);
6
7 // Instanciado um Consequente para a expressao
8 FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeNormal3 = new FuzzyRuleConsequent();
9
10 // Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
11 thenVelocidadeNormal3->addOutput(SaidaDevagar);
12
13 // Instanciando um objeto FuzzyRule
14 FuzzyRule* fuzzyRule03 = new FuzzyRule(3, ifPlanoAndQuaseCompleta,
15     thenVelocidadeNormal3);
16 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule03);

```

A.2.4 Regra 4

A regra 4 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 está completa, caso o VE se encontrar nessa situação é enviado para o motor o valor de saída correspondente ao estado Saída Devagar, conforme descrito nos conjuntos fuzzy na Seção A.1.

```

1 FuzzyRuleAntecedent* ifPlanoAndCarregada = new FuzzyRuleAntecedent();
2 ifPlanoAndCarregada->joinWithAND(Plano, Completa);
3
4 // Instanciado um Consequente para a expressao
5 FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeNormal4 = new FuzzyRuleConsequent();
6
7 // Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
8 thenVelocidadeNormal4->addOutput(SaidaDevagar);
9
10 // Instanciando um objeto FuzzyRule
11 FuzzyRule* fuzzyRule04 = new FuzzyRule(4, ifPlanoAndCarregada,
12     thenVelocidadeNormal4);
13 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule04);

```

A.2.5 Regra 5

A regra 5 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 de pouco aactive e se a bateria está em metade da carga, caso o VE se encontrar nessa situação é enviado para o motor o valor de saída correspondente ao estado Saída Turbo, conforme descrito nos conjuntos fuzzy na Seção A.1.

```

1 FuzzyRuleAntecedent* ifPoucoAcriveAndMetadeCarga =
2     new FuzzyRuleAntecedent();
3 ifPoucoAcriveAndMetadeCarga->joinWithAND(PoucoAcrive, MetadeCarga);
4
5 // Instanciado um Consequente para a expressao
6 FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeTurbo5 = new FuzzyRuleConsequent();
7
8 // Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
9 thenVelocidadeTurbo5->addOutput(SaidaTurbo);
10

```

```

11 // Instanciando um objeto FuzzyRule
12 FuzzyRule* fuzzyRule05 = new FuzzyRule(5, ifPoucoAcliveAndMetadeCarga,
13     thenVelocidadeTurbo5);
14 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule05);

```

A.2.6 Regra 6

A regra 6 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 de pouco aclive e se a bateria está quase completa, caso o VE se encontrar nessa situação é enviado para o motor o valor de saída correspondente ao estado Saída Muito Rápido, conforme descrito nos conjuntos fuzzy na Seção A.1.

```

1 FuzzyRuleAntecedent* ifPoucoAcliveAndQuaseCompleta =
2     new FuzzyRuleAntecedent();
3 ifPoucoAcliveAndQuaseCompleta->joinWithAND(PoucoAclive, QuaseCompleta);
4
5 // Instancinado um Consequente para a expressao
6 FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeMuitoRapido6 = new FuzzyRuleConsequent();
7
8 // Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
9 thenVelocidadeMuitoRapido6->addOutput(SaidaMuitoRapido);
10
11 // Instanciando um objeto FuzzyRule
12 FuzzyRule* fuzzyRule06 = new FuzzyRule(6, ifPoucoAcliveAndQuaseCompleta,
13     thenVelocidadeMuitoRapido6);
14 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule06);

```

A.2.7 Regra 7

A regra 7 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 de pouco aclive e se a bateria está completa, caso o VE se encontrar nessa situação é enviado para o motor o valor de saída correspondente ao estado Saída Rápido, conforme descrito nos conjuntos fuzzy na Seção A.1.

```

1 FuzzyRuleAntecedent* ifPoucoAcliveAndCarregada =
2     new FuzzyRuleAntecedent();
3 ifPoucoAcliveAndCarregada->joinWithAND(PoucoAclive, Completa);

```

```

4
5 // Instanciado um Consequente para a expressao
6 FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeNormal7 = new FuzzyRuleConsequent();
7
8 // Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
9 thenVelocidadeNormal7->addOutput(SaidaRapido);
10
11 // Instanciando um objeto FuzzyRule
12 FuzzyRule* fuzzyRule07 = new FuzzyRule(7, ifPoucoAcriveAndCarregada,
13     thenVelocidadeNormal7);
14 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule07);

```

A.2.8 Regra 8

A regra 8 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 de declive e se a bateria em metade da carga, caso o VE se encontrar nessa situação é enviado para o motor o valor de saída correspondente ao estado Saída Parado, conforme descrito nos conjuntos fuzzy na Seção A.1.

```

1 FuzzyRuleAntecedent* ifDecliveAndQuaseMetadeCarga =
2     new FuzzyRuleAntecedent();
3 ifDecliveAndQuaseMetadeCarga->joinWithAND(Declive, MetadeCarga);
4
5 // Instanciado um Consequente para a expressao
6 FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeParado8 = new FuzzyRuleConsequent();
7
8 // Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
9 thenVelocidadeParado8->addOutput(SaidaParado);
10
11 // Instanciando um objeto FuzzyRule
12 FuzzyRule* fuzzyRule8 = new FuzzyRule(8, ifDecliveAndQuaseMetadeCarga,
13     thenVelocidadeParado8);
14 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule8);

```

A.2.9 Regra 9

A regra 9 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 de declive e se a bateria está em quase

completa, caso o VE se encontrar nessa situação é enviado para o motor o valor de saída correspondente ao estado Saída Parado, conforme descrito nos conjuntos fuzzy na Seção A.1.

```

1 FuzzyRuleAntecedent* ifDecliveAndQuaseCompleta =
2     new FuzzyRuleAntecedent();
3 ifDecliveAndQuaseCompleta->joinWithAND(Declive, QuaseCompleta);
4
5 // Instancinado um Consequente para a expressao
6 FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeParado9 = new FuzzyRuleConsequent();
7
8 // Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
9 thenVelocidadeParado9->addOutput(SaidaParado);
10
11 // Instanciando um objeto FuzzyRule
12 FuzzyRule* fuzzyRule9 = new FuzzyRule(9, ifDecliveAndQuaseCompleta,
13     thenVelocidadeParado9);
14 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule9);

```

A.2.10 Regra 10

A regra 10 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 de declive e se a bateria está completa, caso o VE se encontrar nessa situação é enviado para o motor o valor de saída correspondente ao estado Saída Parado, conforme descrito nos conjuntos fuzzy na Seção A.1.

```

1 FuzzyRuleAntecedent* ifDecliveAndCompleta = new FuzzyRuleAntecedent();
2 ifDecliveAndCompleta->joinWithAND(Declive, Completa);
3
4 // Instancinado um Consequente para a expressao
5 FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeParado10 = new FuzzyRuleConsequent();
6
7 // Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
8 thenVelocidadeParado10->addOutput(SaidaParado);
9
10 // Instanciando um objeto FuzzyRule
11 FuzzyRule* fuzzyRule10 = new FuzzyRule(10, ifDecliveAndCompleta,
12     thenVelocidadeParado10);
13 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule10);

```

Como pode ser verificado no conjunto de regras para a superfície de declive, independente da situação de carga da bateria o valor da variável de saída é sempre o estado Saída Parado, visto que o objetivo do sistema é aumentar a eficiência energética do VE.

A.2.11 Regra 11

A regra 11 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 de pouco declive e se a bateria está metade da carga, caso o VE se encontrar nessa situação é enviado para o motor o valor de saída correspondente ao estado Saída Parado, conforme descrito nos conjuntos fuzzy na Seção A.1.

```

1 FuzzyRuleAntecedent* ifPoucoDecliveAndMetadeCarga =
2     new FuzzyRuleAntecedent();
3 ifPoucoDecliveAndMetadeCarga->joinWithAND(PoucoDeclive, MetadeCarga);
4
5 // Instanciado um Consequente para a expressao
6 FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeDevagar11 = new FuzzyRuleConsequent();
7
8 // Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
9 thenVelocidadeDevagar11->addOutput(SaidaParado);
10
11 // Instanciando um objeto FuzzyRule
12 FuzzyRule* fuzzyRule11 = new FuzzyRule(11, ifPoucoDecliveAndMetadeCarga,
13     thenVelocidadeDevagar11);
14 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule11);

```

A.2.12 Regra 12

A regra 12 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 de pouco declive e se a bateria está quase completa, caso o VE se encontrar nessa situação é enviado para o motor o valor de saída correspondente ao estado Saída Parado, conforme descrito nos conjuntos fuzzy na Seção A.1.

```

1 FuzzyRuleAntecedent* ifPoucoDecliveAndQuaseCompleta =
2     new FuzzyRuleAntecedent();
3 ifPoucoDecliveAndQuaseCompleta->joinWithAND(PoucoDeclive, QuaseCompleta);

```

```

4
5 // Instanciado um Consequente para a expressao
6 FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeDevagar12 = new FuzzyRuleConsequent();
7
8 // Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
9 thenVelocidadeDevagar12->addOutput(SaidaParado);
10
11 // Instanciando um objeto FuzzyRule
12 FuzzyRule* fuzzyRule12 = new FuzzyRule(12, ifPoucoDecliveAndQuaseCompleta,
13     thenVelocidadeDevagar12);
14 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule12);

```

A.2.13 Regra 13

A regra 13 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 de pouco declive e se a bateria está completa, caso o VE se encontrar nessa situação é enviado para o motor o valor de saída correspondente ao estado Saída Parado, conforme descrito nos conjuntos fuzzy na Seção A.1.

```

1 FuzzyRuleAntecedent* ifPoucoDecliveAndCompleta =
2     new FuzzyRuleAntecedent();
3 ifPoucoDecliveAndCompleta->joinWithAND(PoucoDeclive, Completa);
4
5 // Instanciado um Consequente para a expressao
6 FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeDevagar13 = new FuzzyRuleConsequent();
7
8 // Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
9 thenVelocidadeDevagar13->addOutput(SaidaParado);
10
11 // Instanciando um objeto FuzzyRule
12 FuzzyRule* fuzzyRule13 = new FuzzyRule(13, ifPoucoDecliveAndCompleta ,
13     thenVelocidadeDevagar13);
14 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule13);

```

A.2.14 Regra 14

A regra 14 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 de aclave e se a bateria está metade

da carga, caso o VE se encontrar nessa situação é enviado para o motor o valor de saída correspondente ao estado Saída Turbo, conforme descrito nos conjuntos fuzzy na Seção A.1.

```

1 FuzzyRuleAntecedent* ifActiveAndMetadeCarga = new FuzzyRuleAntecedent();
2 ifActiveAndMetadeCarga->joinWithAND(Active, MetadeCarga);
3
4 // Instancinado um Consequente para a expressao
5 FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeTurbo14 = new FuzzyRuleConsequent();
6
7 // Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
8 thenVelocidadeTurbo14->addOutput(SaidaTurbo);
9
10 // Instanciando um objeto FuzzyRule
11 FuzzyRule* fuzzyRule14 = new FuzzyRule(14, ifActiveAndMetadeCarga,
12     thenVelocidadeTurbo14);
13 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule14);

```

A.2.15 Regra 15

A regra 15 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 de aclave e se a bateria está quase completa, caso o VE se encontrar nessa situação é enviado para o motor o valor de saída correspondente ao estado Saída Muito Rápido, conforme descrito nos conjuntos fuzzy na Seção A.1.

```

1 FuzzyRuleAntecedent* ifActiveAndQuaseCompleta =
2     new FuzzyRuleAntecedent();
3 ifActiveAndQuaseCompleta->joinWithAND(Active, QuaseCompleta);
4
5 // Instancinado um Consequente para a expressao
6 FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeMuitoRapido15 =
7     new FuzzyRuleConsequent();
8
9 // Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
10 thenVelocidadeMuitoRapido15->addOutput(SaidaMuitoRapido);
11
12 // Instanciando um objeto FuzzyRule
13 FuzzyRule* fuzzyRule15 = new FuzzyRule(15, ifActiveAndQuaseCompleta,
14     thenVelocidadeMuitoRapido15);
15 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule15);

```

A.2.16 Regra 16

A regra 16 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 de aclave e se a bateria está completa, caso o VE se encontrar nessa situação é enviado para o motor o valor de saída correspondente ao estado Saída Muito Rápido, conforme descrito nos conjuntos fuzzy na Seção A.1.

```

1 FuzzyRuleAntecedent* ifActiveAndCompleta = new FuzzyRuleAntecedent();
2 ifActiveAndCompleta->joinWithAND(Active, Completa);
3
4 // Instanciado um Consequente para a expressao
5 FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadeMuitoRapido16 =
6     new FuzzyRuleConsequent();
7
8 // Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
9 thenVelocidadeMuitoRapido16->addOutput(SaidaMuitoRapido);
10
11 // Instanciando um objeto FuzzyRule
12 FuzzyRule* fuzzyRule16 = new FuzzyRule(16, ifActiveAndCompleta,
13     thenVelocidadeMuitoRapido16);
14 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule16);

```

A.3 LISTAGEM DOS DADOS OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS

Nesta Seção é apresentado os resultados completos obtidos nos 3 (três) cenários de testes (Aclave, Declive e Plano).

A.3.1 Dados dos Experimentos do Cenário Aclave

A Figura 32 apresenta os resultados obtidos nos experimentos realizados na superfície aclave com o Sistema de Controle Fuzzy e o Sistema de Controle *If-Else*. Os resultados realçados em vermelho são os que foram descartados por serem os piores valores e os valores realçados em azul são os melhores valores descartados.

FUZZY				ACLIVE		IF-ELSE			
Resultado dos Experimentos (PWM)						Resultado dos Experimentos (PWM)			
Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão	Consumo Médio (W) Fuzzy	Consumo Médio (W) If-Else	Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão
Leitura 1	137,65	148,00	35,03	11,87	12,26	Leitura 1	142,18	185	56,44
Leitura 2	150,33	148,00	33,52	12,96	12,54	Leitura 2	145,41	185	54,81
Leitura 3	143,68	148,00	28,08	12,39	12,86	Leitura 3	149,18	185	53,19
Leitura 4	147,78	148,00	35,92	12,74	12,72	Leitura 4	149,18	185	53,19
Leitura 5	147,12	148,00	25,42	12,68	13,88	Leitura 5	161,05	185,00	43,51
Leitura 6	145,64	148,00	27,60	12,56	12,76	Leitura 6	148,04	185,00	53,12
Leitura 7	132,71	148,00	44,05	11,44	12,30	Leitura 7	142,62	185,00	54,88
Leitura 8	141,43	148,00	23,89	12,19	12,81	Leitura 8	148,58	185	52,97
Leitura 9	138,14	148,00	28,04	11,91	12,63	Leitura 9	146,50	185	50,63
Leitura 10	139,09	148,00	27,62	11,99	13,63	Leitura 10	158,05	185	46,13
Resultado dos Experimentos (Acelerômetro)						Resultado dos Experimentos (Acelerômetro)			
Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão			Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão
Leitura 1	9,59	10,00	4,39			Leitura 1	11,85	11	6,37
Leitura 2	12,31	12,00	6,00			Leitura 2	11,57	11	7,80
Leitura 3	10,53	11,00	3,46			Leitura 3	10,58	11	4,69
Leitura 4	10,74	11,00	4,57			Leitura 4	10,70	11	6,25
Leitura 5	11,00	11,00	3,64			Leitura 5	11,91	11	3,83
Leitura 6	10,80	11,00	3,53			Leitura 6	10,73	11	5,83
Leitura 7	10,14	9,00	6,73			Leitura 7	10,76	11	5,95
Leitura 8	9,62	10,00	3,33			Leitura 8	11,02	13	4,62
Leitura 9	9,25	10,00	3,04			Leitura 9	10,75	10	3,85
Leitura 10	8,98	10,00	3,26			Leitura 10	11,46	11,5	3,55
Resultado dos Experimentos (Corrente)						Resultado dos Experimentos (Corrente)			
Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão			Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão
Leitura 1	1,0789	1,16	0,27			Leitura 1	1,1143	1,45	0,44
Leitura 2	1,1782	1,17	0,26			Leitura 2	1,1397	1,45	0,43
Leitura 3	1,1261	1,16	0,22			Leitura 3	1,1693	1,45	0,42
Leitura 4	1,1582	1,16	0,28			Leitura 4	1,1565	1,45	0,43
Leitura 5	1,1531	1,16	0,28			Leitura 5	1,2623	1,45	0,34
Leitura 6	1,1415	1,16	0,22			Leitura 6	1,1603	1,45	0,42
Leitura 7	1,0402	1,16	0,35			Leitura 7	1,1178	1,45	0,43
Leitura 8	1,1085	1,16	0,19			Leitura 8	1,1645	1,45	0,42
Leitura 9	1,0827	1,16	0,22			Leitura 9	1,1482	1,45	0,40
Leitura 10	1,0901	1,16	0,22			Leitura 10	1,2388	1,45	0,36

Figura 32: Resultados comparativos (Active) entre o SCF e o SIF.

A.3.2 Dados dos Experimentos do Cenário Declive

A Figura 33 apresenta os resultados obtidos nos experimentos realizados na superfície declive com o Sistema de Controle Fuzzy e o Sistema de Controle *If-Else*. Os resultados realçados em vermelho são os que foram descartados por serem os piores valores e os realçados em azul são os melhores valores descartados.

FUZZY				DECLIVE		IF-ELSE			
Resultado dos Experimentos (PWM)				Consumo Médio (W) Fuzzy	Consumo Médio (W) IF-Else	Resultado dos Experimentos (PWM)			
Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão			Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão
Leitura 1	74,71	42,00	42,89	5,29	6,65	Leitura 1	93,93	40	65,84
Leitura 2	93,58	82,00	47,80	6,62	4,62	Leitura 2	65,36	40	38,58
Leitura 3	65,67	40,00	43,27	4,65	6,12	Leitura 3	86,47	82	57,50
Leitura 4	75,53	40,00	49,91	5,34	7,05	Leitura 4	99,63	61	67,45
Leitura 5	96,15	82,00	56,44	6,80	6,01	Leitura 5	84,94	40	63,37
Leitura 6	81,42	40,00	59,89	5,76	7,17	Leitura 6	101,26	82	59,47
Leitura 7	72,27	50,00	38,92	5,11	7,34	Leitura 7	103,79	82	62,80
Leitura 8	83,40	40,00	56,29	5,90	5,55	Leitura 8	78,37	82	49,97
Leitura 9	58,89	40,00	36,61	4,17	7,02	Leitura 9	99,15	82	64,91
Leitura 10	59,28	40,00	39,05	4,19	5,48	Leitura 10	77,40	40	56,21
Resultados dos Experimentos (Acelerômetro)				Resultados dos Experimentos (Acelerômetro)					
Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão			Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão
Leitura 1	2,76	2,00	6,06			Leitura 1	-0,80	1	17,69
Leitura 2	5,75	4,50	4,85			Leitura 2	-1,43	2	24,51
Leitura 3	-1,53	0,00	9,12			Leitura 3	6,24	4	6,93
Leitura 4	-0,16	0,00	8,18			Leitura 4	2,31	3,5	21,75
Leitura 5	4,62	5,00	8,92			Leitura 5	0,61	0	18,82
Leitura 6	-0,08	0,50	12,78			Leitura 6	4,21	5	15,87
Leitura 7	1,09	3,00	7,42			Leitura 7	4,43	4,5	11,22
Leitura 8	2,53	1,00	8,82			Leitura 8	-0,05	3	12,09
Leitura 9	-0,78	0,00	6,82			Leitura 9	1,65	5	18,50
Leitura 10	0,00	1,00	5,97			Leitura 10	-0,35	-1	15,50
Resultado dos Experimentos (Corrente)				Resultado dos Experimentos (Corrente)					
Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão			Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão
Leitura 1	0,48	0,27	0,28			Leitura 1	0,60	0,26	0,42
Leitura 2	0,60	0,53	0,31			Leitura 2	0,42	0,26	0,25
Leitura 3	0,42	0,26	0,28			Leitura 3	0,56	0,53	0,37
Leitura 4	0,49	0,26	0,32			Leitura 4	0,64	0,39	0,43
Leitura 5	0,62	0,53	0,36			Leitura 5	0,55	0,26	0,41
Leitura 6	0,52	0,26	0,39			Leitura 6	0,65	0,53	0,38
Leitura 7	0,46	0,32	0,25			Leitura 7	0,67	0,53	0,40
Leitura 8	0,54	0,26	0,36			Leitura 8	0,50	0,53	0,32
Leitura 9	0,38	0,26	0,24			Leitura 9	0,64	0,53	0,42
Leitura 10	0,38	0,26	0,25			Leitura 10	0,50	0,26	0,36

Figura 33: Resultados comparativos (Declive) entre o SCF e o SIF.

A.3.3 Dados dos Experimentos do Cenário Plano

A Figura 34 apresenta os resultados obtidos nos experimentos realizados na superfície plana com o Sistema de Controle Fuzzy e o Sistema de Controle *If-Else*. Os resultados realçados em vermelho são os que foram descartados por serem os piores valores e os valores realçados em azul são os melhores valores descartados.

FUZZY				PLANO		IF-ELSE					
Resultado dos Experimentos (PWM)				Consumo Médio (W) Fuzzy	Consumo Médio (W) If-Else	Resultado dos Experimentos (PWM)					
Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão			Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão		
Leitura 1	87,33	82,00	23,30	6,70	5,35	Leitura 1	69,74	82	26,68		
Leitura 2	70,31	73,00	25,06	5,39	5,57	Leitura 2	72,67	82	14,52		
Leitura 3	69,82	73,00	25,89	5,36	5,99	Leitura 3	78,06	82	18,45		
Leitura 4	82,14	92,00	25,93	6,30	4,99	Leitura 4	65,03	82	28,98		
Leitura 5	79,43	92,00	33,22	6,09	5,32	Leitura 5	69,34	82	28,25		
Leitura 6	72,15	82,00	24,74	5,53	5,36	Leitura 6	69,87	82	19,04		
Leitura 7	75,10	82,00	34,98	5,76	5,37	Leitura 7	70,00	82	18,97		
Leitura 8	72,48	82,00	21,98	5,56	5,15	Leitura 8	67,10	82	20,10		
Leitura 9	78,63	82,00	25,39	6,03	5,22	Leitura 9	68,00	82	19,80		
Leitura 10	74,12	82,00	24,51	5,69	5,32	Leitura 10	69,30	82	19,29		
Resultado dos Experimentos (Acelerômetro)				Resultado dos Experimentos (Acelerômetro)							
Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão	Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão	Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão
Leitura 1	5,91	5,00	4,08	Leitura 1	3,19	3	3,63	Leitura 1	3,19	3	3,63
Leitura 2	3,76	3,00	3,38	Leitura 2	4,25	5	2,59	Leitura 2	4,25	5	2,59
Leitura 3	3,55	3,00	2,88	Leitura 3	4,58	5	2,75	Leitura 3	4,58	5	2,75
Leitura 4	5,49	6,00	3,56	Leitura 4	2,22	3	4,19	Leitura 4	2,22	3	4,19
Leitura 5	4,19	6,00	7,12	Leitura 5	4,00	3	2,60	Leitura 5	4,00	3	2,60
Leitura 6	3,85	4,00	2,64	Leitura 6	3,89	5	2,70	Leitura 6	3,89	5	2,70
Leitura 7	4,52	4,00	4,72	Leitura 7	3,88	4	1,97	Leitura 7	3,88	4	1,97
Leitura 8	3,88	4,00	2,04	Leitura 8	3,48	3	2,69	Leitura 8	3,48	3	2,69
Leitura 9	4,74	4,00	3,41	Leitura 9	3,90	3	2,44	Leitura 9	3,90	3	2,44
Leitura 10	4,15	4,00	2,58	Leitura 10	4,07	4	2,90	Leitura 10	4,07	4	2,90
Resultado dos Experimentos (Corrente)				Resultado dos Experimentos (Corrente)							
Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão	Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão	Leitura	Média	Mediana	Desvio Padrão
Leitura 1	0,61	0,57	0,16	Leitura 1	0,49	0,57	0,19	Leitura 1	0,49	0,57	0,19
Leitura 2	0,49	0,51	0,17	Leitura 2	0,51	0,57	0,12	Leitura 2	0,51	0,57	0,12
Leitura 3	0,49	0,51	0,18	Leitura 3	0,54	0,57	0,23	Leitura 3	0,54	0,57	0,23
Leitura 4	0,57	0,64	0,18	Leitura 4	0,45	0,57	0,20	Leitura 4	0,45	0,57	0,20
Leitura 5	0,55	0,64	0,18	Leitura 5	0,48	0,57	0,20	Leitura 5	0,48	0,57	0,20
Leitura 6	0,50	0,57	0,17	Leitura 6	0,49	0,57	0,13	Leitura 6	0,49	0,57	0,13
Leitura 7	0,52	0,57	0,24	Leitura 7	0,49	0,57	0,13	Leitura 7	0,49	0,57	0,13
Leitura 8	0,51	0,57	0,15	Leitura 8	0,47	0,57	0,14	Leitura 8	0,47	0,57	0,14
Leitura 9	0,55	0,57	0,18	Leitura 9	0,47	0,57	0,14	Leitura 9	0,47	0,57	0,14
Leitura 10	0,52	0,57	0,17	Leitura 10	0,48	0,57	0,13	Leitura 10	0,48	0,57	0,13

Figura 34: Resultados comparativos (Plano) entre o SCF e o SIF.

As Figuras supracitadas ilustram os dados comparativos do sistema de controle fuzzy com o sistema de controle if-else em todos os experimentos realizadas na fase de testes. Os dados listados neste apêndice foram utilizados para a produção dos gráficos apresentados no Capítulo 5 desse trabalho.