

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS EMBARCADOS PARA INDÚSTRIA  
AUTOMOTIVA

EDUARDO ZONATTO

**ALGORITMO DE UM CONTROLADOR LÓGICO FUZZY DO MOTOR À  
COMBUSTÃO INTERNA DE UM VEÍCULO CONVENCIONAL  
CONVERTIDO PARA UMA ARQUITETURA ELÉTRICA HÍBRIDA**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA  
2018

EDUARDO ZONATTO

**ALGORITMO DE UM CONTROLADOR LÓGICO FUZZY DO MOTOR À  
COMBUSTÃO INTERNA DE UM VEÍCULO CONVENCIONAL  
CONVERTIDO PARA UMA ARQUITETURA ELÉTRICA HÍBRIDA**

Monografia de Especialização, apresentada ao Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, do Departamento Acadêmico de Eletrônica – DAELN, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. M. Sc. Juliano de Mello Pedroso

Coorientador: Prof. M. Sc. Fernando Zarpelon

CURITIBA  
2018



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Curitiba

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Departamento Acadêmico de Eletrônica  
Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria  
Automotiva



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

### ALGORITMO DE UM CONTROLADOR LÓGICO FUZZY DO MOTOR À COMBUSTÃO INTERNA DE UM VEÍCULO CONVENCIONAL CONVERTIDO PARA UMA ARQUITETURA ELÉTRICA HÍBRIDA

por

EDUARDO ZONATTO

Esta monografia foi apresentada em 06 de Dezembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. M. Sc. Juliano de Mello Pedroso  
Orientador

---

Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas  
Membro titular

---

Prof. M. Sc. Omero Francisco Bertol  
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho a todos aqueles que, de alguma forma, estiveram e estão próximos de mim, fazendo esta vida valer cada vez mais a pena.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, primeiramente, por tornar possível o impossível, pelo dom da vida e pelas oportunidades para vivê-la plenamente. Às nossas famílias pelo incondicional apoio e compreensão. Aos nossos mestres e professores pela paciência e dedicação ao nos guiar pelo conhecimento. Aos nossos amigos e colegas profissionais que contribuíram com suas experiências e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

“Dê-me Senhor, agudeza para entender, capacidade de reter, método e a faculdade para aprender, sutileza para interpretar, graça e abundância para falar. Dê-me, Senhor, acerto ao começar, direção ao progredir e perfeição ao concluir.”

**São Tomás de Aquino**

## RESUMO

ZONATTO, Eduardo. **Algoritmo de um controlador lógico fuzzy do motor à combustão interna de um veículo convencional convertido para uma arquitetura elétrica híbrida**. 2018. 85 p. Monografia de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

A eletrificação é o futuro do transporte em uma sociedade onde os impactos ambientais causados pelo uso de combustíveis fósseis estão assumindo proporções catastróficas. Em um período marcado pela escassez de recursos naturais, aumento dos preços dos combustíveis e leis rigorosas de emissões, muitos governos estão trabalhando para proibir a produção e a venda de veículos movidos somente a combustíveis fósseis, exigindo veículos sem combustível e com zero emissões. Por isso, veículos elétricos e híbridos são uma realidade, mas por um longo tempo eles vão coexistir com veículos convencionais ainda. Atualmente, um veículo elétrico ou híbrido custa mais do que um equivalente convencional, dado o mesmo uso. No entanto, é possível converter veículos convencionais em um com uma arquitetura híbrida ou elétrica completo por meio de kits comerciais. Em relação aos veículos convertidos, um dos maiores desafios é o gerenciamento da distribuição de energia de diferentes fontes, atendendo a uma estratégia de economia de combustível e redução de emissões de gases causadores do efeito estufa. O controlador lógico *fuzzy* é o mais comum dentre os controladores conhecidos como tendo uma estratégia baseada em regras e tem a vantagem da simplicidade, exigindo baixa capacidade de processamento e considerado um controlador em tempo real. Este trabalho apresenta um algoritmo para controlar o acionamento de um motor de combustão interna baseado na lógica *fuzzy* que pode ser incorporada em um controlador de um sistema global de gerenciamento de energia de um veículo convencional convertido em uma arquitetura elétrica híbrida. Cada etapa do controlador é apresentada incluindo a base de regras, funções de pertinência, sistema de inferência, agregação, fuzzificação e defuzzificação, tendo como resposta o instante em que o motor deve ser ligado e a potência demanda. Uma simulação de um veículo elétrico híbrido é utilizada para obter os sinais de entrada do controlador em um ciclo de teste padrão conhecida como FTP-75, que simula a direção de um veículo em um ambiente urbano. Como resultado, a resposta de cada etapa do controlador é apresentada, comparadas com o esperado segundo a base de regras, bem como a decisão tomada pelo controlador de lógica *fuzzy*.

**Palavras-chave:** Controlador Lógico Fuzzy. Veículo Elétrico Híbrido. Sistema de Gerenciamento de Energia. Controlador de Acionamento de um Motor. Estratégias Inteligentes de Controle.

## ABSTRACT

ZONATTO, Eduardo. **Fuzzy logic controller algorithm of the internal combustion engine of a conventional vehicle converted to a hybrid electric architecture.** 2018. 85 p. Monografia de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Electrification is the future of transportation in a society where the environmental impacts caused by the use of fossil fuels are taking catastrophic proportions. In a period shaped by natural resource shortages, rising fuel prices and strict emission laws, many governments are working to ban the production and sale of vehicles powered only by fossil fuels, and requiring vehicles with no fuel and with zero emissions. Because of that, electric and hybrid vehicles are a reality, but for a long time they will coexist with conventional vehicles yet. Actually, an electric or hybrid vehicle costs more than a conventional given the same use. However, it is possible to convert conventional vehicles to a hybrid or full electric vehicle using commercial kits. Regarding convert vehicles, one of the biggest challenges is the management of energy distribution of different sources aiming a strategy of saving fuel and reducing greenhouse emissions. The fuzzy logic controller is the most common among the controllers better known as having a rules-based strategy, and has the advantage of simplicity, requiring low processing capacity and considered a real-time controller. This work presents an algorithm for controlling the internal combustion engine based on fuzzy logic that can be part of global energy management system in conventional vehicle converted to a hybrid electrical architecture. Each controller step is presented including the base of rules, membership functions, inference system, aggregation, and as an output the decision taken to drive the internal combustion engine. A simulation of a hybrid electric vehicle has been used to obtain the input signals of the controller over a standard test cycle known as FTP-75 that simulates a direction in an urban environment. As result the response of each step of the controller is presented as well as the decision taken by the fuzzy logic controller.

**Keywords:** Fuzzy Logic Control. Hybrid Electric Vehicle. Power Management System. ICE controller. Intelligent Control Strategies.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de um veículo elétrico híbrido micro .....	23
Figura 2 - Diagrama de um veículo elétrico híbrido leve .....	24
Figura 3 - Diagrama de um veículo elétrico híbrido forte ou completo .....	24
Figura 4 - Diagrama de um veículo elétrico híbrido plug-in .....	25
Figura 5 - Arquitetura em paralelo de um veículo elétrico híbrido .....	26
Figura 6 - Arquitetura em série de um veículo elétrico híbrido .....	27
Figura 7 - Arquitetura em série-paralelo de um veículo elétrico híbrido .....	27
Figura 8 - Componentes básicos de um kit de conversão.....	29
Figura 9 - Exemplo de instalação de um kit de conversão .....	29
Figura 10 - Valor nítido ou singleton.....	36
Figura 11 - Diagrama em blocos de um controlador lógico fuzzy .....	36
Figura 12 - Exemplos de números fuzzy .....	37
Figura 13 - Exemplo de funções de pertinência e um valor de entrada .....	38
Figura 14 - Resultado da saída do controlador para potência do motor.....	40
Figura 15 - Resultado da saída do controlador para potência do motor.....	41
Figura 16 - Diagrama em blocos da estratégia de controle de um HEV.....	43
Figura 17 - Torque do veículo (N.m) .....	44
Figura 18 - Estado da carga da bateria (SoC).....	44
Figura 19 - Estado de acionamento do ICE .....	45
Figura 20 - Potência demandada do veículo .....	46
Figura 21 - Estado da carga da bateria (SoC).....	46
Figura 22 - Potência de saída do ICE .....	47
Figura 23 - Diagrama da simulação dos blocos e subsistemas do HEV .....	48
Figura 24 - Torque total do veículo (N.m).....	49
Figura 25 - Estado da carga da bateria (%) .....	49
Figura 26 - Potência total do veículo (kW) .....	49
Figura 27 - Diagrama geral do sistema de inferência fuzzy .....	50
Figura 28 - Superfície 3D do sistema de inferência fuzzy .....	51
Figura 29 - Base de regras do sistema de inferência <i>fuzzy</i> .....	51
Figura 30 - Apresentação visual da base de regras do sistema de inferência <i>fuzzy</i> .....	52
Figura 31 - Superfície 3D do sistema de inferência fuzzy .....	52
Figura 32 - Diagrama da simulação do HEV com FLC.....	53
Figura 33 - Função de pertinência trapezoidal .....	55

Figura 34 - Função de pertinência triangular.....	55
Figura 35 - Função de pertinência trapezoidal tipo R.....	56
Figura 36 - Função de pertinência trapezoidal tipo L .....	57
Figura 37 - Função de pertinência de saída para acionamento .....	59
Figura 38 - Função de pertinência de saída para controle de potência.....	59
Figura 39 - Resultado da etapa defuzzyficação e pós-tratamento do acionamento ..	60
Figura 40 - Resultado da etapa defuzzyficação do controle de potência .....	60
Figura 41 - Diagrama geral do controlador lógico fuzzy para acionamento do motor	61
Figura 42 - Fluxograma para classificação das entradas no conjunto fuzzy .....	62
Figura 43 - Fluxograma para verificar quais regras são ativadas.....	62
Figura 44 - Fluxograma para verificar qual o menor grau de pertinência das variáveis .....	63
Figura 45 - Fluxograma para inferência e agregação das saídas de cada regra .....	63
Figura 46 - Fluxograma para defuzzificação e avaliação da saída.....	64
Figura 47 - Status do motor no ciclo completo obtido pelo FLC.....	69
Figura 48 - Potência demandada do ICE obtido pelo FLC .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Funções de pertinência para variáveis de entrada.....	54
Tabela 2 - Funções de pertinência para o SoC e o torque total do veículo .....	54
Tabela 3 - Resultados obtidos na etapa de fuzzificação para o torque .....	65
Tabela 4 - Resultados obtidos na etapa de fuzzificação para o SoC .....	66
Tabela 5 - Resultados obtidos na etapa de fuzzificação para a Potência .....	66
Tabela 6 - Resultados obtidos de regras ativadas para o acionamento do ICE .....	67
Tabela 7 - Resultados obtidos de regras ativadas para a potência do ICE .....	67
Tabela 8 - Resultados obtidos da agregação da saída para acionamento.....	68
Tabela 9 - Resultados obtidos da agregação da saída para acionamento.....	68
Tabela 10 - Resultados obtidos da agregação das regras ativadas.....	69

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Combinação de antecedentes e uso de conectivos .....	39
Quadro 2 - Operadores de Zadeh .....	39
Quadro 3 - Base de regras para acionamento do ICE .....	42
Quadro 4 - Matriz de decisão para o controlador do motor .....	45
Quadro 5 - Matriz de decisão para o controlador do motor .....	47
Quadro 6 - Sinais do modelo HEV extraídos da simulação.....	49
Quadro 7 - Condicionais para fuzzificação das entradas .....	54
Quadro 8 - Condicionais para uma função trapezoidal .....	55
Quadro 9 - Condicionais para uma função triangular .....	56
Quadro 10 - Condicionais para uma função trapezoidal tipo R .....	56
Quadro 11 - Condicionais para uma função trapezoidal tipo L.....	57
Quadro 12 - Condicionais da Base de Regras dos FLCs.....	58
Quadro 13 - Funções de pertinência de acionamento e potência do ICE .....	58
Quadro 14 - Regras da etapa de pós-tratamento e decisão de acionamento .....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Espaço tridimensional que pode ser definido como tendo três
A	Alto
ADVISOR	Programa para análise do desempenho e economia de combustível
B	Baixo
BEV	Veículo Elétrico à Bateria ( <i>Battery Electric Vehicle</i> )
BoA	Método Bissetor da Área ( <i>Bisector of Area</i> )
C++	Linguagem de programação compilada multi-paradigma e de uso geral
CARB	Conselho de Recursos Atmosféricos da Califórnia
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
CoA	Método Centro da Área ( <i>Center of Area</i> )
CoG	Método Centro da Gravidade ( <i>Center of Gravity</i> )
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CoS	Método Centro da Soma ( <i>Center of Some</i> )
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DCONAMA	Departamento de Apoio ao Conselho Nacional do Meio Ambiente
EA	Extremamente alto
EB	Extremamente Baixo
EEA	Agência Europeia do MA ( <i>European Environmental Agency</i> )
EM	Motor Elétrico ( <i>Electric Motor</i> )
EPA	Agência Americana de Proteção ao Meio Ambiente
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESS	Sistema de Armazenamento de Energia ( <i>Energy Storage System</i> )
EUA	Estados Unidos da América
EV	Veículo Elétrico ( <i>Electric Vehicle</i> )
FCHEV	Veículo com Célula de Combustível ( <i>Fuel Cell Vehicle</i> )
FIS	Sistema de Inferência Fuzzy ( <i>Fuzzy Inference System</i> )
FLC	Controlador Lógico Fuzzy ( <i>Fuzzy Logic Controller</i> )
FoM	Limite à Esquerda do Método de Máxima ( <i>First of Maxima</i> )
FP	Função de Pertinência
FTP-75	Procedimento Federal de Testes da EPA

HEV	Veículo Elétrico Híbrido ( <i>Hybrid Electric Vehicle</i> )
ICE	Motor à Combustão Interna ( <i>Internal Combustion Engine</i> )
LoM	Límite à Direita do Método de Máxima ( <i>Last of Maxima</i> )
M	Médio
MA	Muito alto
MATLAB®	Programa interativo de alto desempenho voltado para o cálculo
MB	Muito Baixo
MME	Ministério de Minas e Energia
MoM	Método Média da Máxima ( <i>Medium of Maxima</i> )
NiMH	Níquel-hidreto metálico
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PHEV	Veículo Elétrico Híbrido do tipo <i>Plug-in</i> ( <i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i> )
Simulink	Ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos
SoC	Estado de Carga da Bateria ( <i>State of Charge</i> )

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS .....	20
1.1.1 Objetivo Geral .....	20
1.1.2 Objetivos Específicos .....	20
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	21
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>22</b>
2.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS.....	22
2.1.1 Classificação dos Veículos Elétricos Híbridos.....	22
2.1.1.1 Veículos elétricos híbridos micros .....	22
2.1.1.2 Veículos elétricos híbridos leves .....	23
2.1.1.3 Veículos elétricos híbridos fortes ou completos .....	24
2.1.1.4 Veículos elétricos híbridos plug-in .....	25
2.1.2 Arquitetura dos Veículos Elétricos Híbridos .....	25
2.1.2.1 Sistema híbrido em série.....	26
2.1.2.2 Sistema híbrido em paralelo.....	26
2.1.2.3 Sistema híbrido série-paralelo ou misto .....	27
2.2 KITS DE CONVERSÃO DE CARROS CONVENCIONAIS EM HÍBRIDOS.....	28
2.2.1 Informações Básicas sobre Conversão de Veículos .....	28
2.2.2 Soluções de Conversão Ofertadas pelo Mercado .....	29
2.2.3 Agências e Órgãos Certificadores e Reguladores.....	30
2.3 SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA DE HEVs .....	31
2.3.1 Objetivos do Gerenciamento de Energia em HEVs.....	31
2.3.2 O problema do gerenciamento de energia em HEVs .....	33
2.3.3 Caracterização de um controlador de gerenciamento de energia .....	33
2.3.4 Classificação de Estratégias de Gestão de Energia.....	34
2.3.5 Sistemas Inteligentes para Gerenciamento de Energia em HEVs .....	34
2.3.5.1 Sistemas baseados em lógica fuzzy .....	35
2.3.5.2 Controlador lógico fuzzy .....	35
2.3.5.3 Métodos de fuzzificação .....	37
2.3.5.4 Métodos de inferências .....	38
2.3.5.5 Operações com conjuntos fuzzy .....	39
2.3.5.6 Métodos de agregação.....	39
2.3.5.7 Métodos de defuzzificação .....	40
2.3.5.8 Base de regras .....	42
<b>3 DESENVOLVIMENTO DO TEMA</b> .....	<b>43</b>
3.1 ESTRATÉGIA DE ACIONAMENTO DO MOTOR À COMBUSTÃO (ICE).....	43
3.2 ESTRATÉGIA DE CONTROLE DO MOTOR À COMBUSTÃO (ICE) .....	45
3.3 MODELO DE SIMULAÇÃO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO .....	47
3.4 MODELO DE SIMULAÇÃO DO FLC DE ACIONAMENTO DO ICE .....	50
3.4.1 Simulação do Sistema de Inferência Fuzzy.....	50
3.4.2 Teste do FIS na Simulação do Veículo Elétrico Híbrido .....	52
3.5 DESENVOLVIMENTO DA LÓGICA DO CONTROLADOR LÓGICO FUZZY.....	53
3.5.1 Descrição do Controlador de Lógica Fuzzy .....	53
3.5.1.1 Fuzzificação e pré-tratamento das variáveis de entrada .....	53
3.5.1.2 Avaliação e inferência da base de regras fuzzy .....	57
3.5.1.3 Agregação de saída .....	58

3.5.1.4 Defuzzificação e pós-tratamento das variáveis de saída.....	59
3.6 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO DO CONTROLADOR LÓGICO FUZZY	
61	
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>65</b>
4.1 RESULTADOS PARA ETAPA DE FUZZIFICAÇÃO .....	65
4.2 RESULTADOS PARA A ETAPA DE INFERÊNCIA.....	66
4.3 RESULTADOS PARA DEFUZZIFICAÇÃO .....	67
4.4 RESULTADOS DO ACIONAMENTO DO MOTOR .....	68
4.5 RESULTADO GERAL DO FLC PARA SIMULAÇÃO NO PROTOCOLO FTP-7569	
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>71</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS .....	72
<b>ANEXO A: BASE DE REGRAS PARA O ACIONAMENTO DO MOTOR .....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXO B: BASE DE REGRAS PARA A POTÊNCIA DO MOTOR .....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXO C: FIS DO ACIONAMENTO DO MOTOR NO MATLAB .....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO D: FIS DA POTÊNCIA DO MOTOR NO MATLAB.....</b>	<b>82</b>
<b>ANEXO E: ALGORITMO DO FLC PARA ACIONAMENTO DO ICE .....</b>	<b>83</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Os combustíveis fósseis são um recurso finito e a cada ano eles ficam mais caros em relação às renováveis, mas ainda são as principais fontes de energia do mundo. Formados a partir de material orgânico ao longo de milhões de anos, os combustíveis fósseis têm alimentado o desenvolvimento econômico do mundo ao longo desde e do século passado. Hoje, as indústrias de combustíveis fósseis perfuram ou minam essas fontes de energia, queimam-nas para produzir eletricidade ou refinam-nas para uso como combustível para aquecimento ou transporte. Nos últimos 20 anos, quase três quartos das emissões causadas pelo homem vieram da queima de combustíveis fósseis (EESI, 2018a).

Muitos dos efeitos causados pela extração até a queima destes combustíveis são fáceis de ver, como a poluição e degradação da terra, mas às vezes, menos óbvias, como o aumento da incidência da asma e do câncer, ou os impactos no aumento do nível do mar. Os processos de extração geram poluição do ar e da água e prejudicam as comunidades locais. O transporte de combustíveis da mina ou poço causa poluição do ar e levam a sérios acidentes e derramamentos. Quando os combustíveis são queimados, emitem toxinas e emissões de aquecimento global. Mesmo os resíduos são perigosos para a saúde pública e o meio ambiente (UCS, 2016).

Uma das maiores fontes de emissões de gases de efeito estufa das atividades humanas é a queima de combustíveis fósseis para eletricidade, calor e transporte. No setor de transporte, a maioria das emissões é resultante da combustão de produtos à base de petróleo, como a gasolina, em motores de combustão interna utilizada no transporte de pessoas, representando mais da metade das emissões do setor. As emissões remanescentes vêm de outros meios de transporte, incluindo caminhões de carga, aeronaves comerciais, navios, barcos e trens, além de oleodutos e lubrificantes (EPA, 2017).

Mesmo com o aumento da eficiência energética dos veículos e a dependência de biocombustíveis, a eletrificação será necessária para descarbonizar completamente o setor de transporte. E, embora a economia exata de carbono dos veículos elétricos (EVs) dependa de como a eletricidade é gerada, um estudo do Laboratório Nacional de Energias Renováveis de 2016 constatou que até os EVs

alimentados por eletricidade a carvão emitem menos carbono do que um veículo movido à gasolina. Neste cenário, a eletrificação de veículos é o foco atual e o uso cada vez maior de energia proveniente de fontes geradoras alternativas como eólica e solar, para uso no sistema de propulsão de veículos. Diversos tipos de veículos com emissões baixas ou zero, estão sendo produzidos atualmente e muitos outros em desenvolvimento por diversas indústrias do setor (EESI, 2018b).

Diversos países já anunciaram uma possível data para o banimento parcial ou total de novos veículos que utilizam combustíveis fósseis circulando em seus territórios e, a partir de então, somente a comercialização de veículos puramente elétricos será aceita: Coreia do Sul (2020), Inglaterra (2040), Noruega (2025), Holanda (2030), Japão (em andamento), Alemanha (2030), França (2040), China (2040). Além disso, diversas cidades por si só já o fizeram como: Atenas (2025), Barcelona (2030), Bruxelas (2025), Délhi (em andamento), Londres (2030), Los Angeles (2030), Milão (2030), Vancouver (2030) (ROBERTS, 2017).

Grandes montadoras diante deste cenário, o que antes era promessa e agora está se tornando realidade, já anunciaram que não irão mais produzir carros com motores à combustão interna e aceleraram lançamentos de veículos totalmente elétricos: Volkswagen (2025), Mercedes Benz (2022), Volvo Cars (2019), BMW (2025) além, é claro, de montadoras que só produzem carros elétricos como a Tesla (ROBERTS, 2017).

Segundo a Comissão Europeia para Mobilidade e Transporte (ECMT, 2018) sobre mobilidade e transporte com o uso de veículos elétricos, a eletricidade como vetor de energia para propulsão de veículos, oferece a possibilidade de substituir o óleo combustível por uma ampla diversidade de fontes de energias primárias. Isto poderia garantir a segurança do abastecimento energético e uma ampla utilização de fontes de energia renováveis e isentas de carbono no setor dos transportes, o que poderia ajudar as metas da União Europeia em matéria de redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

Os veículos movidos à eletricidade podem utilizá-la como combustível principal de propulsão ou para melhorar a eficiência dos projetos de veículos convencionais com motores à combustão. Também podem reduzir as emissões que contribuem para as mudanças climáticas e a poluição, melhorando a saúde pública e reduzindo os danos ecológicos. O uso de veículos elétricos permite uma maior

diversidade de opções de combustíveis para transporte além dos derivados do petróleo, além de reduzir a dependência da importação deste combustível fóssil, pois quase toda a eletricidade dos EUA é produzida a partir de fontes domésticas, incluindo carvão, energia nuclear, gás natural e fontes renováveis de acordo com Departamento de Energia dos Estados Unidos (AFDC, 2018).

Em um estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) do Ministério de Minas e Energia do Brasil (COELHO, 2017), a realidade atual do país impõe uma série de barreiras à entrada dos veículos puramente elétricos num horizonte próximo: A infraestrutura (postos de recarga, mão de obra qualificada, precificação da energia, regulamentação), o custo dos veículos (baterias e tecnologia) e as baterias (autonomia, tempo de recarga e peso dos veículos). De acordo com os mesmos estudos, não se considera a entrada de veículos elétricos puros até 2026. A produção de híbridos pelas montadoras nacionais começaria a partir de 2021 atingindo uma frota de 360 mil veículos híbridos no Brasil em 2026. O veículo elétrico puro não seria prioridade para o governo brasileiro, pois o mesmo avança no sentido do uso dos biocombustíveis, reservando os elétricos puros somente a nichos de mercado como frotas de táxi, serviços de entrega, serviços de compartilhamento de veículos. A conclusão é que o veículo híbrido é uma alternativa interessante para o Brasil.

Dados disponibilizados pela Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético do Ministério de Minas e Energia do Brasil (SPDE, 2018) a participação das fontes renováveis de energia na matriz energética brasileira foi de 43,5% no ano de 2016, contra apenas 9,5%, nos países da OCDE e de 14,2% na média mundial. Dentro das energias renováveis, o etanol e o bagaço da cana detêm a maior participação, de 40,1%. Destaca-se também que a energia hidráulica, limpa e renovável, que responde por 64% da eletricidade gerada. Carros elétricos, portanto, seriam ambientalmente vantajosos em comparação com aqueles movidos a gasolina ou diesel. Essa vantagem permanece mesmo quando comparada aos veículos movidos a etanol, um combustível sustentável que é menos prejudicial ao meio ambiente. Segundo Beck (2017), um carro híbrido de etanol pode ser a melhor solução para o país. No mesmo artigo, Takahira também afirma que a hibridização de motores flexíveis é um avanço em termos tecnológicos.

Segundo o Anuário da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017), a frota brasileira de automóveis, até o ano de 2016, é de aproximadamente 51,3 milhões de veículos com apenas 4,5 mil (0,0087%) veículos classificados como elétricos. De acordo com o Relatório Anual de Frota Circulante 2018 (SINDIPEÇAS, 2018), a frota circulante de automóveis foi de aproximadamente 36 milhões de veículos e a idade média da frota atingiu 9 anos e 6 meses. No mesmo relatório a frota por combustível a participação de carros elétricos foi considerada inexpressiva até então.

Diante deste cenário, onde já foi anunciado o banimento da produção de novos veículos convencionais e restrições à circulação de veículos que não atendam as leis de emissões por diversos países por volta do ano de 2030, existe uma questão a ser respondida que é o que fazer com os veículos convencionais em circulação para que possam se adequar as novas leis de emissões mais restritivas e continuarem a circular em seus territórios? Para estes há a possibilidade da instalação de um kit para conversão de veículos convencionais para uma arquitetura puramente híbrida.

De acordo com a análise da TechNavio, diversas autoridades governamentais trabalham para obter economias de escala para kits de conversão, tentando reduzir o preço resultando em um impacto positivo no mercado global de kits de conversão de veículos híbridos até 2021 levando à adoção crescente desta tecnologia de atualização. A crescente mudança para veículos movidos a combustíveis alternativos e puramente elétricos é devido ao aumento dos níveis de poluição visto em cidades urbanas. A fraca infraestrutura de carregamento nos países emergentes, como a Índia e Brasil, levou as autoridades a impulsionar a adoção de tecnologia híbrida e kits de conversão. Em mercados como nos Estados Unidos, Europa e Ásia, já há respaldo legal para permitir a adaptação e certificar os fabricantes de kits de conversão e fornecedores automotivos importantes começaram a oferecer tecnologia de adaptação (TECHNAVIO, 2017).

Como a instalação de um kit de conversão elétrica híbrida não elimina o motor à combustão, mas sim melhora o desempenho e autonomia do veículo e, conseqüentemente, reduz o seu nível de emissões, além dos componentes físicos, há a necessidade de um sistema supervisor para gerenciar a distribuição de energia, obtendo o melhor desempenho da combinação motor à combustão, conjunto de baterias e o motor elétrico.

Dentre as diversas funções que o sistema supervisorio precisa controlar, uma delas é a proposta deste trabalho, que é um algoritmo de controle baseado em lógica *fuzzy* para o controle do motor à combustão interna (ICE), que é uma das estratégias de gerenciamento de energia mais utilizada para esta aplicação, podendo ser integrado ao sistema supervisorio da distribuição de energia em veículos convencionais convertidos para uma arquitetura híbrida de propulsão. Como este algoritmo, dependendo das variáveis de entrada e da estratégia pré-estabelecida, o sistema supervisorio será capaz de decidir sobre o acionamento e controle do motor à combustão.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolvimento de um algoritmo de controle do motor à combustão interna (ICE) de um veículo convencional convertido para uma arquitetura elétrica híbrida, baseado na teoria de controle de lógica *fuzzy*, que possa ser integrado ao sistema de gerenciamento do fluxo de energia no veículo.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Revisar literatura sobre veículos elétricos híbridos quanto à classificação e arquiteturas mais comuns.
- Revisar literatura sobre a conversão de veículos convencionais em híbridos e seus componentes básicos, exemplo de empresas no mercado e órgãos legisladores e fiscalizadores.
- Identificar os objetivos principais do gerenciamento de energia em veículos elétricos híbridos.
- Identificar os sistemas inteligentes para gerenciamento de energia.
- Caracterizar um sistema para gerenciamento de energia baseado em lógica *fuzzy*.
- Simular um veículo elétrico híbrido para obter dos sinais necessários para o teste de algoritmo utilizando o ciclo de teste FTP-75.

- Desenvolver o algoritmo de controle do motor à combustão interna baseado de lógica *fuzzy*.
- Comparar os resultados das saídas do algoritmo de controle com os da simulação para validação do seu funcionamento.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

- Capítulo 1 - Introdução: Apresentação do objetivo geral e objetivos específicos deste trabalho, justificativa da importância da eletrificação de veículos ou a hibridização minimizar os impactos ao meio ambiente causado pelo uso de combustíveis fósseis.
- Capítulo 2 - Fundamentação Teórica: Uma introdução sobre veículos elétricos híbridos, classificação e arquiteturas, explicação sobre os kits de conversão de carros convencionais em HEVs, soluções ofertadas pelo mercado, além de agências e órgãos reguladores. Visão geral sobre sistemas de gerenciamento de energia em HEVs, objetos, problemas. Caracterização de um controlador, estratégias de gerenciamento, e uma explicação mais detalhada sobre controladores baseados em lógica *fuzzy*.
- Capítulo 3 - Desenvolvimento do Tema: Apresentação de uma estratégia de controle baseado em lógica *fuzzy* para o motor à combustão; simulação de um veículo híbrido e controlador lógico *fuzzy* no MATLAB® para extração de sinais e para verificar a estratégia de controle proposta; detalhamento do algoritmo de controle explicando cada etapa do controlador lógico *fuzzy*. Com o algoritmo desenvolvido, o mesmo será escrito em linguagem C++, usando um ambiente de desenvolvimento integrado com a finalidade obter os mesmos resultados da simulação do controlador lógico *fuzzy*.
- Capítulo 4 - Apresentação e Análise dos Resultados: Apresentação dos resultados obtidos para cada etapa do controlador quanto aos seus requisitos e definições: Fuzzificação, Inferência, Defuzzificação e Pós-tratamento e o resultado geral do controlador no ciclo de testes FTP-75
- Capítulo 5 - Considerações finais: Apresentação das conclusões sobre os resultados desse trabalho e recomendações sobre trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para que se entenda a importância do algoritmo de controle proposto neste trabalho, foi necessário compreender os fundamentos sobre veículos elétricos híbridos, sua classificação e arquiteturas, entender qual a finalidade dos kits de conversão de veículos convencionais em veículos híbridos, fundamentos e objetivos dos sistemas de gerenciamento de energia em veículos híbridos e quais os sistemas inteligentes focando no funcionamento de um controlador que aplica a teoria da lógica *fuzzy*, além da teoria da própria lógica *fuzzy*. Assuntos que serão abordados neste capítulo.

### 2.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS

Os veículos híbridos elétricos (HEVs) são veículos que combinam um motor de combustão interna (ICE) com um sistema de tração elétrica. Um veículo híbrido deve conter pelo menos duas fontes de dispositivos de armazenamento de energia, como bateria, tanque de gasolina ou tanque de hidrogênio. Com base nos dispositivos de armazenamento de energia, deve haver também fontes correspondentes de energia, como ICE ou motor elétrico, dentro do veículo para converter a energia em energia mecânica. O resultado final é que a potência mecânica para as rodas pode potencialmente, mas não necessariamente, vir de múltiplas fontes (MI; MASRUR, 2017).

#### 2.1.1 Classificação dos Veículos Elétricos Híbridos

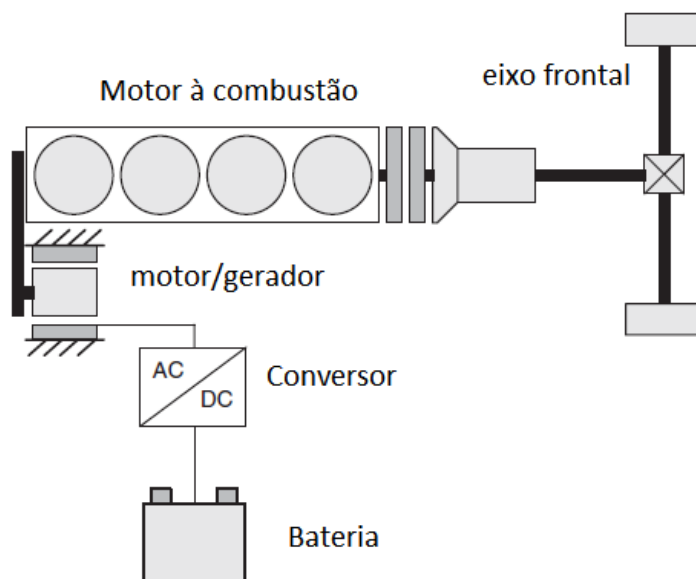
De acordo com o grau de hibridização, atualmente os veículos elétricos híbridos podem ser classificados como: micros híbridos, híbridos suaves, híbridos fortes ou completos e do tipo *plug-in*. Esses veículos elétricos híbridos são descritos resumidamente a seguir.

##### 2.1.1.1 Veículos elétricos híbridos micros

São normalmente operados a baixas tensões entre 12 V e 48 V. Devido à baixa tensão operacional, a capacidade de potência é frequentemente inferior a 5 kW

e, portanto, os veículos elétricos híbridos micros (Figura 1) têm, principalmente, funcionalidade *start-stop*<sup>1</sup> automática. Em circunstâncias de frenagem e marcha lenta, o motor de combustão interna é automaticamente desligado, para que a economia de combustível possa ser melhorada em 5 a 10% durante as condições de direção em ciclo urbano (LIU, 2017).

**Figura 1 - Diagrama de um veículo elétrico híbrido micro**



**Fonte: Adaptado de Crolla et al. (2015).**

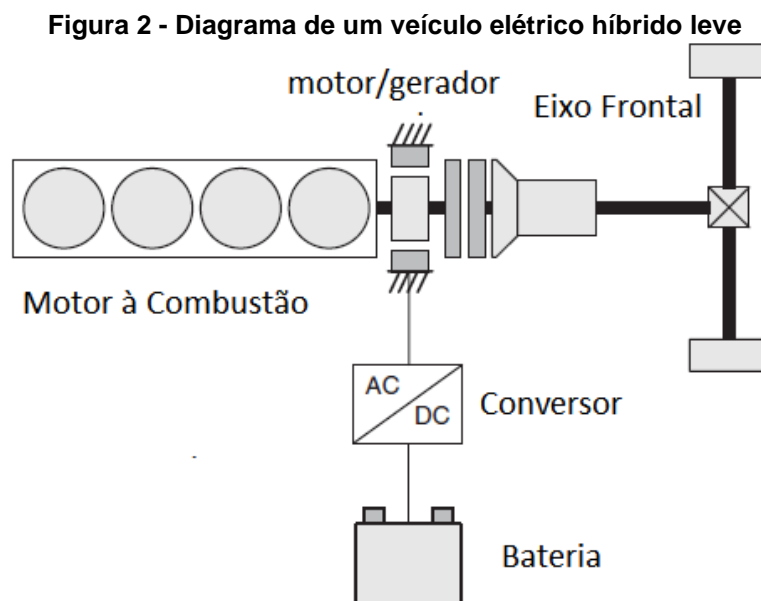
### 2.1.1.2 Veículos elétricos híbridos leves

Possuem um trem-de-força<sup>2</sup> elétrico independente que fornece 5-20 kW de poder de propulsão elétrico, e o sistema de acionamento elétrico normalmente opera a tensões entre 48 V e 200 V. Veículos elétricos híbridos leves (Figura 2) podem fazer uso de um motor elétrico para auxiliar o motor de combustão interna durante as fases de aceleração agressiva e permitir a recuperação da energia regenerativa durante as fases de desaceleração. A melhoria da economia de combustível é alcançada principalmente através do desligamento do motor quando o veículo está parado, usando a energia elétrica para dar partida no veículo (LIU, 2017).

<sup>1</sup> Tecnologia *Start-Stop* - É uma tecnologia automotiva que desliga automaticamente o motor após alguns segundos da parada do veículo e volta a ligá-lo, também automaticamente, quando o pedal de freio é aliviado, ou quando o pedal da embreagem é pressionado.

<sup>2</sup> Trem-de-força - conjunto de componentes que são responsáveis pela geração e transmissão de força até o solo para que o equipamento seja tracionado.



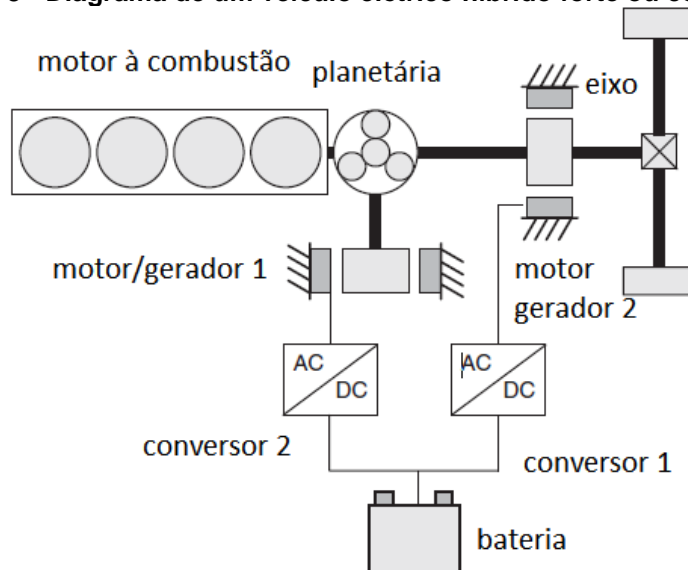


Fonte: Adaptado de Crolla et al. (2015).

### 2.1.1.3 Veículos elétricos híbridos fortes ou completos

Aqui, o sistema de acionamento elétrico normalmente tem mais de 40 kW de potência e opera em um nível de voltagem acima de 150 V para a eficiência operacional do sistema elétrico (Figura 3). O trem-de-força elétrico de um veículo elétrico híbrido completo é capaz de alimentar o veículo exclusivamente por curtos períodos de tempo quando o motor de combustão funciona com menor eficiência, e o sistema de armazenamento de energia é projetado para armazenar energia de frenagem regenerativa livre durante vários cenários de desacelerações (LIU, 2017).

**Figura 3 - Diagrama de um veículo elétrico híbrido forte ou completo**

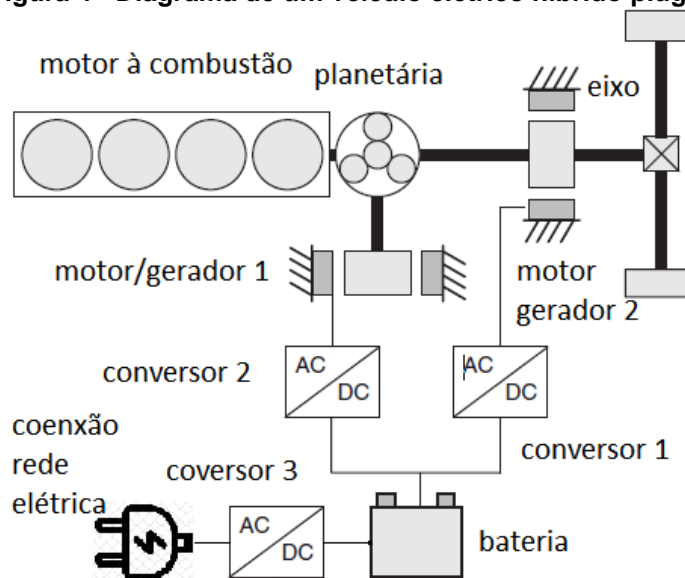


Fonte: Adaptado de Crolla et al. (2015).

### 2.1.1.4 Veículos elétricos híbridos plug-in

Veículos elétricos híbridos plug-in (PHEVs), com o diagrama apresentado na Figura 4, compartilham as características de veículos elétricos totalmente híbridos e veículos totalmente elétricos com a capacidade de carregar a bateria através de uma tomada de CA conectada à rede elétrica. O trem-de-força elétrico dos PHEVs normalmente tem uma capacidade de energia elétrica de 80 a 150 kW que permite que o veículo opere em modo exclusivamente elétrico com um alcance elétrico de 32 a 100 quilômetros na maioria das rotas de direção diárias. Semelhante a BEVs, um PHEV também usa energia da rede para carregar a bateria. Durante uma rota de condução, o veículo normalmente primeiro opera no modo elétrico usando a energia armazenada na bateria; uma vez que a bateria está esgotada a certo nível, o motor de combustão interna começa a impulsionar o veículo e a bateria fornece energia elétrica suplementar e armazena energia de frenagem regenerativa como um HEV completo para melhorar a economia de combustível e desempenho dinâmico e também reduzir as emissões (LIU, 2017).

**Figura 4 - Diagrama de um veículo elétrico híbrido plug-in**



Fonte: Adaptado de Crolla et al. (2015).

### 2.1.2 Arquitetura dos Veículos Elétricos Híbridos

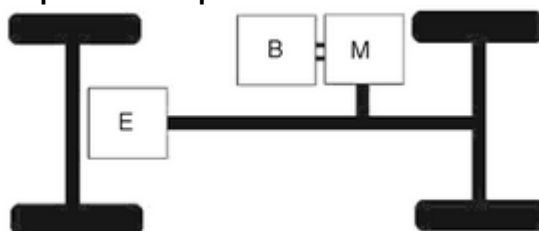
O principal desafio para o projeto de um HEV é como gerenciar várias fontes de energia, o que é altamente dependente dos ciclos de condução, dimensionamento do ICE, dimensionamento da bateria, dimensionamento do motor elétrico e o

gerenciamento da bateria (LO, 2009). As arquiteturas básicas de um HEV podem ser divididas em 3 tipos: HEVs em Paralelo, Série e Série-Paralelo.

#### 2.1.2.1 Sistema híbrido em série

O Veículo Elétrico Híbrido em Série (Figura 5), no qual o motor, acoplado a um gerador, alimenta o gerador para recarregar as baterias e / ou fornecer energia elétrica para o motor elétrico. O motor por sua vez, fornece todo o torque para as rodas. O sistema de armazenamento de energia (ESS) é carregado ou descarregado para atingir a economia de combustível ideal, enquanto o motor elétrico impulsiona o veículo para cumprir os requisitos de desempenho do veículo. . Portanto, em termos simples, um veículo híbrido em série é um veículo elétrico com um grupo gerador para fornecer energia elétrica quando o ESS não tem energia suficiente para alimentar o veículo. Neste tipo de sistema, a principal função do grupo gerador é estender o alcance do veículo elétrico além do que é possível somente com a bateria. O principal desafio técnico deste tipo de veículo elétrico híbrido é gerenciar as fontes de energia e o fluxo de energia de forma melhorada (LIU, 2017).

**Figura 5 - Arquitetura em paralelo de um veículo elétrico híbrido**



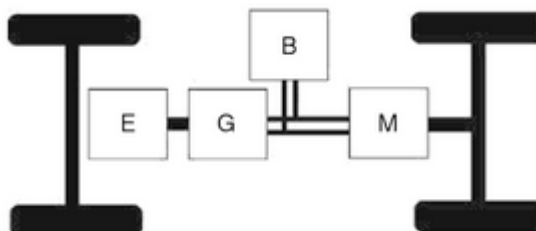
Onde: Bateria [B], Motor Elétrico [M], Motor à Combustão [E]  
Fonte: Pistoia (2010).

#### 2.1.2.2 Sistema híbrido em paralelo

O Veículo Elétrico Híbrido em Paralelo é impulsionado por um motor à combustão interna (ICE) ou um motor elétrico, ou ambos. O motor elétrico funciona como um gerador para recarregar as baterias durante a frenagem regenerativa ou quando o motor está produzindo mais potência do que o necessário para impulsionar o veículo. Em uma configuração HEV paralela, como mostrado na Figura 6, um sistema de trem-de-força elétrico é adicionado ao sistema de trem-de-força convencional por meio de uma embreagem que permite que o veículo seja acionado pelo motor elétrico ou pelo motor à combustão interna (ICE) separadamente ou em

conjunto. O motor pode ser ligado e desligado frequentemente em resposta à estratégia de controle do sistema (LIU, 2017).

**Figura 6 - Arquitetura em série de um veículo elétrico híbrido**

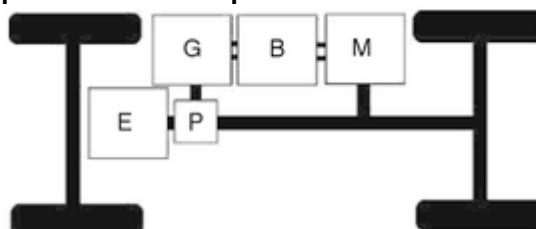


Onde: Bateria [B], Motor Elétrico [M], Motor à Combustão [E], Gerador [G]  
Fonte: Pistoia (2010).

### 2.1.2.3 Sistema híbrido série-paralelo ou misto

A configuração elétrica híbrida série-paralela atua em todos os momentos como uma combinação das configurações em série e paralela (Figura 7). Ele permite que o trem-de-força do motor elétrico ajuste a carga do motor para obter a economia de combustível ideal. A porcentagem de energia que flui através dos caminhos séries e caminhos paralelos é determinada em tempo real para alcançar o desempenho ideal do veículo. Portanto, a arquitetura híbrida série-paralela combina os aspectos positivos da arquitetura híbrida em série - a independência da operação do motor das condições de condução - com a vantagem da arquitetura híbrida paralela - transmissão mecânica eficiente. A complexidade da tarefa de controle para a configuração série-paralelo é o principal ponto distinto comparado aos sistemas paralelos ou em série individuais (LIU, 2017).

**Figura 7 - Arquitetura em série-paralelo de um veículo elétrico híbrido**



Onde: Bateria [B], Motor Elétrico [M], Motor à Combustão [E], Gerador [G], Planetária [P]  
Fonte: Pistoia (2010).

## 2.2 KITS DE CONVERSÃO DE CARROS CONVENCIONAIS EM HÍBRIDOS

O kit de conversão do veículo elétrico híbrido (HEV) permite que o veículo convencional seja convertido em veículo elétrico híbrido (HEV) ou HEV (PHEV) plug-in. O kit de conversão oferece opções além do que está disponível nos fabricantes de equipamentos originais automotivos (OEMs). O desenvolvimento do kit de conversão permite a conversão de veículos leves e pesados em veículos híbridos de maneira econômica e confiável. No entanto, os kits de conversão não estão limitados apenas ao híbrido; eles são escalonáveis para converter um veículo convencional para completar EV (CM, 2018).

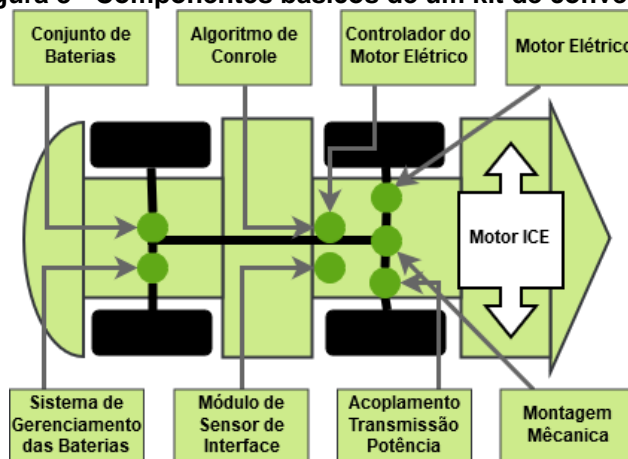
Neste item serão apresentadas informações técnicas básicas e de mercado sobre kits de conversão de carros convencionais em carros elétricos híbridos. Neste trabalho não fez parte do escopo fazer comparativos técnicos, discutir questões legais sobre o processo de conversão, tampouco fazer levantamento de curvas de eficiência e emissões.

### 2.2.1 Informações Básicas sobre Conversão de Veículos

Por definição, um veículo convertido é aquele que foi modificado para usar um combustível ou fonte de energia diferente daquele para o qual foi originalmente projetado. Um veículo convencional pode ser convertido, em um veículo elétrico híbrido (HEV), um veículo elétrico híbrido do tipo “plug-in” (PHEV) ou um veículo totalmente elétrico (EV). Desde veículos leves até pesados podem ser convertidos para operar somente com eletricidade ou para melhorar a eficiência dos projetos de veículos convencionais através da hibridização. Os sistemas usados para converter veículos em HEVs e PHEVs exigem a certificação de agências e órgãos governamentais, atendendo regulamentações, códigos e padrões técnicos que se aplicam a todos os combustíveis alternativos e sistemas de conversão de veículos (AFDC, 2018).

A Figura 8, ilustra uma configuração básica de um carro convencional convertido para uma arquitetura híbrida, os seus principais componentes mecânicos, eletroeletrônicos e sistemas controladores.

**Figura 8 - Componentes básicos de um kit de conversão**



Autoria: Adaptado de CarToq (2018).

### 2.2.2 Soluções de Conversão Ofertadas pelo Mercado

Existe uma gama de tecnologias e sistemas disponíveis no mercado para eletrificação parcial e total de qualquer tipo de veículo, desde carros de passeio até caminhões pesados e ônibus (Figura 9). Nenhuma delas, no entanto, é ofertada pela quase totalidade das montadoras de veículos, o que gera um grande número de discussões e limitações técnicas como: Perda de garantia de fábrica ocasionada pela modificação, ausência de estudos e testes sobre o desempenho, segurança e confiabilidade do veículo após a conversão, riscos para a saúde e meio ambiente devido à presença das baterias e operação com tensões consideradas perigosas, etc. (LEITMAN; BRANT, 2009).

**Figura 9 - Exemplo de instalação de um kit de conversão**



Fonte: Adaptado de XL (2018).

De maneira geral, existem dois tipos de kits de conversão: kits dedicados para um modelo específico de uma marca, e kit genéricos que podem ser usados em qualquer veículo. Existem diversas empresas que fazem estes tipos de conversão sendo que algumas das principais são:

- **Zelectric Motors (ZM):** Oferece Volkswagens e Porsches antigos, totalmente restaurados e eletrificados usando as últimas baterias de lítio, oferece um alcance de 130 a 160 quilômetros com carga completa (ZM, 2018);
- **Ian Motion (IM):** Oferece Austin Minis usando um sistema de bateria de lítio que dá ao clássico britânico um alcance próximo a 160 quilômetros (IM, 2018);
- **Complete Coach Works (CCW):** Adapta antigos ônibus a diesel em veículos elétricos (CCW, 2018);
- **Altigreen:** Converte diferentes plataformas de veículos em veículos elétricos e híbridos desde veículos de três rodas até tratores (ALTIGREEN, 2018);
- **XL:** Especializada em eletrificação e hibridização de frotas de veículos para modelos das marcas Ford, GMC e Isuzu (XL, 2018);
- **ALTe Technologies:** Desenvolve e instala sistemas de propulsão elétrica para veículos comerciais, convertendo-os para elétricos híbridos, híbridos, em série e totalmente elétricos (AC, 2018).

### 2.2.3 Agências e Órgãos Certificadores e Reguladores

Cada país ou bloco econômico tem o seu conjunto de órgãos e agências responsáveis pela regularização, homologação e fiscalização relacionados a instalação e os equipamentos de conversão de veículos convencionais em híbridos ou elétricos. Os principais órgão e agências para os principais mercados automobilísticos são:

- **Agência Americana de Proteção ao Meio Ambiente (EPA):** É uma agência federal do governo dos Estados Unidos da América, encarregada de proteger a saúde humana e o meio ambiente: ar, água e terra. Define padrões de qualidade e emissões de ar em todo o país e supervisiona os esforços e a fiscalização do estado;
- **Conselho de Recursos Atmosféricos da Califórnia (CARB):** Localizado nos Estados Unidos da América, é encarregado de proteger o público dos efeitos

nocivos da poluição do ar e desenvolver programas e ações para combater as mudanças climáticas no estado da Califórnia, definindo os padrões de emissões mais rigorosos do estado para uma variedade de fontes de poluição em todo o estado, incluindo veículos, combustíveis e produtos de consumo;

- **Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN):** É o órgão máximo normativo, consultivo e coordenador da política nacional de trânsito, competente do Sistema Nacional de Trânsito, responsável pela regulamentação do Código de Trânsito Brasileiro no Brasil (DENATRAN, 2018);
- **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA):** CONAMA é o órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente. No plano normativo, tendo sido a responsável pela coordenação dos grupos de trabalho, que culminaram com a edição das resoluções referentes ao controle das emissões veiculares de poluentes no Brasil (DCONAMA, 2018);
- **Agência Europeia do Meio Ambiente (EEA):** É uma agência da União Europeia, cuja missão é fornecer informação sólida e independente sobre o ambiente. A EEA visa apoiar o desenvolvimento sustentável, ajudando a alcançar uma melhoria significativa e mensurável no ambiente da Europa, através da disponibilização atempada, direcionada, informação relevante e fiável aos agentes de formulação de políticas e ao público (EEA, 2018).

## 2.3 SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA DE HEVs

O sistema de gerenciamento da energia em veículos híbridos consiste em determinar a divisão de energia ideal entre as fontes de energia presentes no veículo, e fluxo da mesma entre os diversos componentes do sistema, atendendo a várias restrições.

### 2.3.1 Objetivos do Gerenciamento de Energia em HEVs

O objetivo geral do controle de um veículo híbrido é maximizar a economia de combustível e minimizar as emissões. Para atingir estes objetivos, algumas variáveis-chave do sistema devem ser governadas de maneira ideal; estas incluem principalmente o fluxo de energia do sistema, a disponibilidade de energia e potência, as temperaturas dos subsistemas e a dinâmica do motor à combustão interna (ICE) e



do motor elétrico (EM). Dentre vários fatores que podem afetar o desempenho e economia de combustíveis e da diminuição de emissões podem-se destacar os seguintes objetivos do gerenciamento de energia em veículos (ZHANG; NI, 2011):

- **Funcionamento do ICE nos pontos de operação ideais:** O ICE tem pontos de operação ideais em seu plano de torque-velocidade em termos de economia de combustível e emissões. Se o ICE operar nesses pontos, a economia de combustível é máxima, e as emissões mínimas. Se operar fora desses pontos, há o comprometimento entre economia de combustível e redução das emissões.
- **Diminuição da dinâmica do ICE:** Como um ICE tem inércia, energia adicional é consumida para gerar a cinética relacionada sempre que a velocidade de operação muda. Portanto, a velocidade de operação do ICE deve ser mantida constante o máximo possível e quaisquer flutuações rápidas devem ser evitadas.
- **Otimização da rotação operacional do ICE:** De acordo com o princípio de funcionamento de um ICE, sua eficiência de combustível é baixa se o ICE operar em baixa rotação (*idle*). A rotação do ICE pode ser controlada independentemente da velocidade do veículo e pode até ser desligada quando sua velocidade estiver abaixo de um determinado valor, a fim de obter benefícios máximos.
- **Tempos de ativação / desativação do ICE:** O ICE em um HEV pode ser ligado e desligado frequentemente, pois possui uma fonte de energia secundária; além disso, os tempos nos quais o ICE é ligado / desligado podem ser determinados com base em um método de controle ideal para minimizar o consumo de combustível e as emissões.
- **Otimização do Estado de Carga da Bateria (SoC):** O SoC da bateria precisa ser controlado de maneira ideal para fornecer energia suficiente para alimentar o veículo e aceitar energia regenerativa durante a frenagem ou durante a descida, além de maximizar sua vida útil. A estratégia de controle mais simples é desligar o ICE se o SoC da bateria estiver alto e ligar o ICE se o SoC estiver muito baixo.
- **Otimização da distribuição de energia:** Como existem duas fontes de energia em um HEV, a tarefa mais importante é dividir a demanda de energia do veículo

entre o ICE e o motor elétrico com base no cenário de direção, condições de estrada e clima, bem como o estado do sistema de armazenamento de energia (ESS), para alcançar a melhor economia de combustível, emissões mínimas e vida útil máxima do ESS.

### 2.3.2 O problema do gerenciamento de energia em HEVs

Em um veículo convencional, não há a necessidade de uma estratégia de gerenciamento de energia, pois existe somente uma fonte de energia. O motorista decide sobre a entrega instantânea de energia usando os pedais de freio e acelerador que são traduzidos em ações pelo controle de baixo nível e a unidade de controle do motor (ECU) determina a quantidade de combustível a ser injetada (ZHANG; NI, 2011).

Por outro lado, em um HEV, há uma decisão adicional que deve ser tomada: a quantidade de potência que é fornecida por cada uma das fontes de energia do veículo. É por isso que todos os veículos híbridos incluem um controlador para o gerenciamento de energia, interposto entre o motorista e os controladores dos componentes. A decisão da melhor estratégia de divisão depende da aplicação específica que, na maioria dos casos, busca diminuir o consumo de combustível, diminuir as emissões de poluentes, aumentar a vida útil da bateria ou todos esses objetivos combinados (ZHANG; NI, 2011).

### 2.3.3 Caracterização de um controlador de gerenciamento de energia

Um controlador de gerenciamento de energia de um HEV é projetado para atender à demanda de potência do motorista, otimizando a economia de combustível e reduzindo as emissões, e mantendo o estado de carga (SoC) da bateria em um nível desejado para permitir a entrega efetiva de energia ao veículo em uma gama de condições de condução (ONORI; SERRAO; RIZZONI, 2016).

As estratégias de gerenciamento de energia baseadas no conhecimento são os métodos mais populares, usam regras ou lógica *fuzzy* para implementação de gerenciamento de energia em um HEV. As categorias desse conhecimento são (MURPHEY, 2008):

- Conhecimento heurístico que depende do mapa de eficiência de um motor;

- Conhecimento sobre a potência adequada dividida entre duas fontes de energia para a minimização do custo de consumo equivalente, que é gerado por métodos ótimos, como a programação dinâmica;
- Previsão do ambiente de condução usando rede neural e lógica *fuzzy* para otimização da potência do veículo.

A lógica *fuzzy* e as redes neurais têm sido usadas com muita frequência no desenvolvimento de controladores para gerenciamento de energia em HEVs. O objetivo é aperfeiçoar a eficiência do ICE, motor elétrico e baterias. As estratégias de controle dos HEVs são mais complicadas que as dos veículos convencionais, devido às configurações e modos de operação mais complexos (MURPHEY, 2008).

#### 2.3.4 Classificação de Estratégias de Gestão de Energia

Várias estratégias de gerenciamento de energia têm sido propostas na literatura. Duas tendências gerais podem ser identificadas que lidam com o problema de gerenciamento de energia, a saber, métodos de otimização baseados em regras e baseados em modelos. A principal característica das abordagens baseadas em regras é sua eficácia na implementação em tempo real. Eles não envolvem minimização ou otimização explícita, mas dependem de um conjunto de regras para decidir o valor do controle a ser aplicado a cada vez. Os métodos de controle de otimização baseados em modelo não podem ser usados diretamente para implementação em tempo real e não se prestam diretamente à implementação prática, devido à sua pré-visualização e complexidade computacional (ONORI; SERRAO; RIZZONI, 2016).

#### 2.3.5 Sistemas Inteligentes para Gerenciamento de Energia em HEVs

Nas duas últimas décadas, as abordagens de sistemas inteligentes, como lógica *fuzzy* e redes neurais, foram introduzidas com sucesso no campo do controle de e gerenciamento de energia HEVs. As aplicações de sistemas inteligentes no gerenciamento de energia de veículos incluem vários aspectos, como determinação de divisão de energia para veículos elétricos híbridos paralelos e previsão do padrão de direção para a melhoria do desempenho geral do veículo e da eficiência de combustível. O gerenciamento de energia do veículo está mudando gradualmente de

sistemas baseados em regras com a ajuda de mapas de eficiência estática e otimização específica do ciclo de direção usando controle otimizado para a abordagem inteligente baseada na previsão do padrão de direção e das condições da estrada (ONORI; SERRAO; RIZZONI, 2016).

#### 2.3.5.1 Sistemas baseados em lógica fuzzy

A lógica *fuzzy* é uma extensão da lógica booleana de Lotfi Zadeh (ZADEH, 1965) baseada na teoria matemática dos conjuntos *fuzzy*, que é uma generalização da teoria dos conjuntos clássica. É uma forma de lógica de valores múltiplos para lidar com imprecisão e granularidade da informação (ZHANG; NI, 2011).

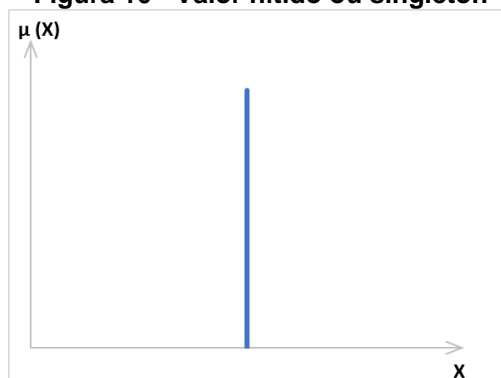
Conjuntos *fuzzy* fornecem métodos para modelar dados incertos ou ambíguos. Uma vantagem da lógica *fuzzy* para formalizar o raciocínio humano é que as regras são definidas em linguagem natural (JAGER, 1995).

#### 2.3.5.2 Controlador lógico fuzzy

Os controladores lógicos *fuzzy* (FLCs) são usados para representar a experiência e o conhecimento humano em termos de variáveis linguísticas chamadas de regras *fuzzy*. Esta experiência ajusta as entradas do sistema para obter uma saída desejada apenas olhando a saída do sistema sem qualquer conhecimento da dinâmica do sistema e variações de parâmetros internos. A implementação de regras linguísticas na lógica *fuzzy*, baseadas nos procedimentos feitos por humanos, também não requer um modelo matemático do sistema (ALTAS, 2017).

Existem vários tipos de controladores fuzzy, sendo os mais conhecidos os controladores *fuzzy* do tipo Mamdani e Sugeno. A diferença mais fundamental entre o Mamdani e o Sugeno é a maneira como a saída nítida (*singleton*), conforme mostrado na Figura 10, é gerada a partir das entradas *fuzzy*. Enquanto o Mamdani usa a técnica de defuzzificação pra se obter a saída nítida, o Sugeno usa a média ponderada para calcula-la. O poder expressivo e a interpretabilidade do Mamdani são perdidos no Sugeno, já que os consequentes das regras não são funções de pertinência, mas o Sugeno tem melhor tempo de processamento desde que a média ponderada substitui o demorado processo de defuzzificação (KAUR; KAUR, 2012).

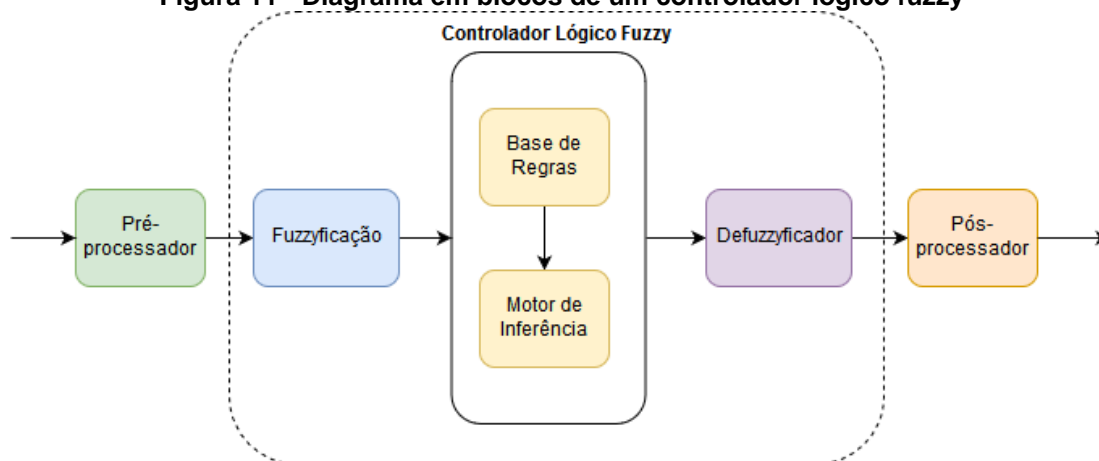
**Figura 10 - Valor nítido ou singleton**



Fonte: Autoria própria.

Uma estrutura típica de um controlador lógico *fuzzy* é mostrada na Figura 11.

**Figura 11 - Diagrama em blocos de um controlador lógico fuzzy**

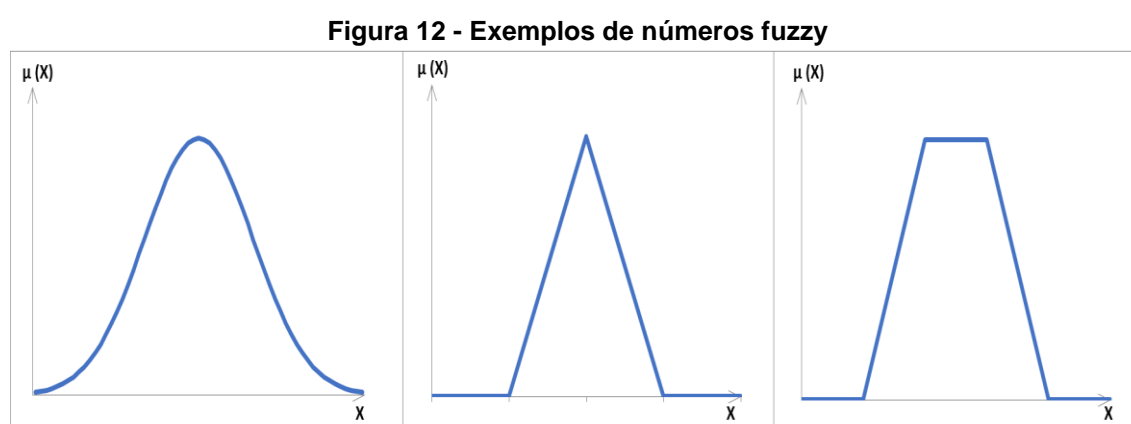


Fonte: Autoria própria.

Na estratégia de gerenciamento de energia de um veículo usando um FLC, as regras são desenvolvidas por pesquisadores para o que o controlador determine efetivamente a divisão de energia entre várias fontes de energia em veículos, assim como o momento em que cada fonte de energia será acionada. O FLC pode ser construído com base em algumas variáveis como, por exemplo, o SoC do sistema de armazenamento de energia (ESS), a velocidade do veículo, posição do pedal do acelerador, entre outras. O objetivo é melhorar a eficiência operacional de diferentes fontes de energia para todos os tipos de veículos (ZHANG; NI, 2011)

### 2.3.5.3 Métodos de fuzzificação<sup>3</sup>

Um número *fuzzy* é uma generalização de um número real e regular no sentido de que não se refere a um único valor, mas sim a um conjunto conectado de valores possíveis, em que cada valor pode ser qualquer valor entre 0 e 1. Um número *fuzzy* é representado por uma função de pertinência cuja forma pode ser do tipo: sigmoide, hiperbólica, tangente, exponencial, gaussiana, triangular, trapezoidal, conforme visto na Figura 12, sendo que a trapezoidal e a triangular são as mais utilizadas na maioria dos casos (ZHANG; PHILLIS; KOUIKOGLOU, 2005).



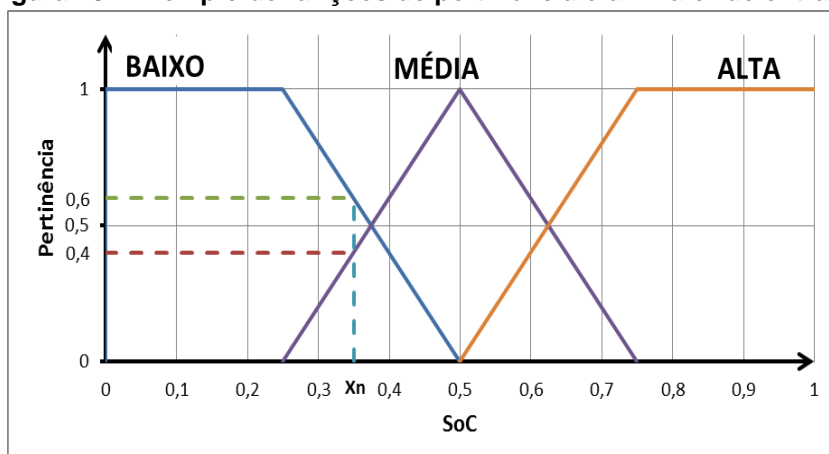
Fonte: Zhang, Phillis e Kouikoglou (2005).

Nessa etapa cada entrada tem um determinado grau de pertinência em cada um dos conjuntos fuzzy apropriados por meio das funções de pertinência. A entrada é sempre um valor numérico nítido limitado ao universo do discurso da variável de entrada. A saída é um grau de pertinência no conjunto linguístico qualificado, sempre no intervalo de 0 a 1.

Na Figura 13, são mostradas as funções de pertinência (FP) para uma variável de entrada que representa o estado de carga da bateria (SoC), cujo conjunto linguístico *fuzzy* é descrito por três FPs nominadas de Baixa, Normal e Alta respectivamente. Por exemplo, um valor ( $x_n$ ) de entrada de 0,35, intercepta as FPs Baixa e Normal ao mesmo tempo e os graus de pertinência (valores em  $y$ ) são: 0,6 para FP Baixa e 0,4 para FP Normal. Sendo assim, qualquer valor de entrada pode ser fuzzificado e pertencerá à pela menos uma FP do conjunto linguístico fuzzy com certo grau de pertinência nele.

<sup>3</sup> Fuzzificação: Termo adaptado à língua portuguesa devido à falta de um termo melhor que descreva o processo.

Figura 13 - Exemplo de funções de pertinência e um valor de entrada



Fonte: Autoria própria.

#### 2.3.5.4 Métodos de inferências

Conforme descrito por (LEE, 1990), há quatro tipos de sistemas de inferência *fuzzy*:

- Mamdani (MAMDANI, 1974);
- Larsen (LARSEN, 1980);
- Tsukamoto (TSUKAMOTO, 1977);
- Takagi e Sugeno (TAKAGI; SUGENO, 1985).

Os métodos mais utilizados em sistemas de inferência para aplicações práticas são os de Mamdani, Takagi e Sugeno.

Dentro da lógica *fuzzy*, as regras devem ser representadas por uma função de implicação. Tal implicação *fuzzy* tem a mesma função que a tabela verdade de implicação na lógica booleana clássica. Nesta, a implicação é denotada por  $A \rightarrow B$ , que pode ser visto como uma representação da declaração *Se A então B*. Na lógica *fuzzy*, esses tipos de instruções são geralmente chamados de instruções *fuzzy* SE-ENTÃO ou regras *fuzzy* (CHEN; PHAM, 2000).

Uma regra *fuzzy*, segundo (JAGER, 1995), é uma declaração SE-ENTÃO em que a o antecedente e o conseqüente consistem em proposições *fuzzy*. O antecedente pode conter uma combinação de proposições por meio dos conectivos lógicos E OU. Também é possível que uma proposição *fuzzy* seja baseada em

conectivo NEGADO. Exemplos de uma combinação de antecedentes e um conseqüente podem ser visto no Quadro 1.

**Quadro 1 - Combinação de antecedentes e uso de conectivos**

<b>Condicionais</b>
<b><i>Se</i></b> $x_1$ é $A_1$ <b><i>E</i></b> $x_2$ é $A_2$ <b>ENTÃO</b> $y$ é $B$
<b><i>Se</i></b> $x_1$ é $A_2$ <b>OU</b> $x_2$ é $A_5$ <b>ENTÃO</b> $y$ é $C$
<b><i>Se</i></b> $x_1$ é $A_5$ <b><i>E</i></b> $x_2$ <b>NÃO</b> é $A_1$ <b>ENTÃO</b> $y$ é $D$

**Fonte: Autoria própria.**

### 2.3.5.5 Operações com conjuntos fuzzy

Normalmente, a maioria das aplicações de lógica *fuzzy* faz o uso de operadores descritos por Zadeh no Quadro 2 (ZADEH, 1965).

**Quadro 2 - Operadores de Zadeh**

Interseção E	União OU	Complemento NEGADO
$\min(\mu_A(x), \mu_B(x))$	$\max(\mu_A(x), \mu_B(x))$	$1 - \mu_A(x)$

**Fonte: Zadeh (1965).**

Para o conectivo E, a função associada é a função de mínimo, ou seja,  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$  estão limitados ao intervalo  $[0,1]$ , usando a função  $\min(\mu_A(x), \mu_B(x))$ , a resposta é o menor valor entre  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$ . Usando o mesmo raciocínio para o conectivo OU, a função associada é a função de máximo, ou seja, usando a função  $\max(\mu_A(x), \mu_B(x))$ , a resposta é o maior valor entre  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$ . Finalmente, o conectivo NEGADO é equivalente à operação  $1 - \mu_A(x)$ , ou seja, o resultado da operação é o complemento (ROSS, 2017).

### 2.3.5.6 Métodos de agregação

Como as decisões são baseadas no teste de todas as regras do controlador, as saídas de cada regra ativada devem ser agregadas pelo processo no qual as saídas de cada regra ativada são combinadas em um único conjunto *fuzzy*. A agregação só ocorre uma vez para cada variável de saída. Em todos os novos valores de entrada todas as etapas iniciam-se novamente.

A entrada do processo de agregação são as funções de pertinência truncadas da saída como resultado do processo de implicação para cada regra que foi ativada.

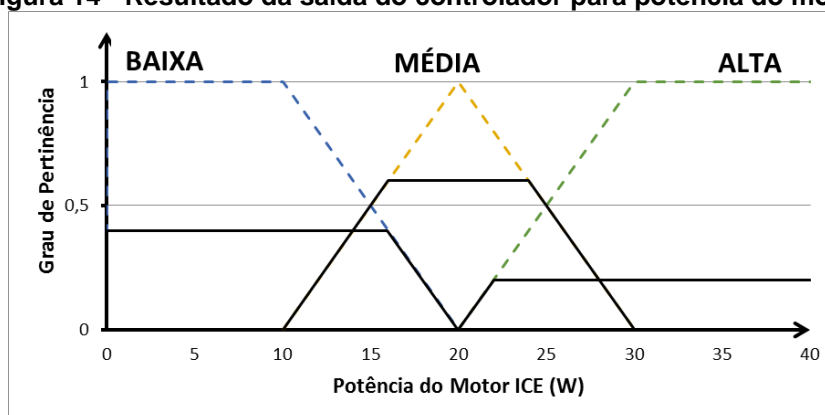


A saída do processo de agregação é um conjunto *fuzzy* para cada variável de saída (MATHWORKS, 2018). Desde que o método de agregação seja comutativo, a ordem na qual as regras são executadas não é importante. De forma geral há três principais métodos de agregação (TÓTH-LAUFER; TAKÁCS, 2012):

- Max (máximo);
- Probor (OU probabilístico);
- Soma (soma dos conjuntos de saída de regra);

Por exemplo, na Figura 14, são mostradas as funções de pertinência (FP) truncadas para uma variável de entrada que representa o estado de carga da bateria (SoC) para um determinado conjunto de regras ativadas. É utilizado o Método da Soma onde é criado um conjunto com as saídas agregadas simplesmente pelo cálculo da soma de cada conjunto *fuzzy* de saída da regra de implicação ativada.

**Figura 14 - Resultado da saída do controlador para potência do motor**



Fonte: Autoria própria.

#### 2.3.5.7 Métodos de defuzzificação<sup>4</sup>

A defuzzificação é o processo de produzir um resultado nítido, dados os conjuntos *fuzzy* e os graus de pertinência correspondentes. O valor defuzzificado no controlador representa a ação a ser tomada no controle do processo. De acordo com (SAMANTA, 2018), há diversos métodos empregados para defuzzificação sendo os mais comuns:

- Método Centro da Soma (CoS);
- Método de centro de gravidade (CoG);

<sup>4</sup> Defuzzificação – Termo adaptado à língua portuguesa devido à falta de um termo melhor que descreva o processo.

- Método Centro de área (CoA);
- Método Bissetor de Área (BoA);
- Método da Média Ponderada;
- Limite à Esquerda do Método de Máxima (FoM)
- Limite à Direita do Método de Máxima (LoM);
- Média do Método de Máxima (MoM).

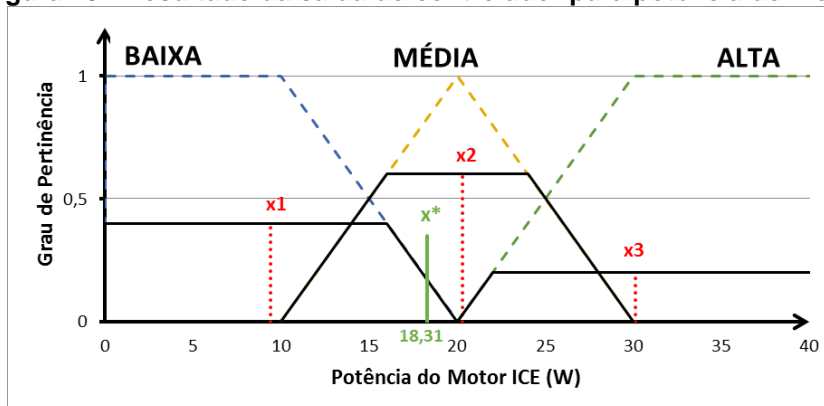
A diferença mais fundamental entre os métodos apresentados é em termos de como o valor da saída do sistema é obtido a partir das entradas *fuzzy*. Mamdani usa a técnica do Centro de Gravidade para o processo de defuzzificação; enquanto Sugeno e Tsukamoto usam Média Ponderada para calcular a saída nítida. Como já dito, Sugeno e Tsukamoto tem um melhor tempo de processamento para uma defuzzificação através da Média Ponderada. Devido à natureza interpretada e intuitiva a partir da base de regras, o tipo Mamdani é amplamente utilizado, especialmente para aplicações de suporte à decisão (Sari, Fauziati, & Wahyunggoro, 2016).

Dentro dos métodos listados acima, foi utilizado neste trabalho o Método da Soma (CoS). Esse método é menos intensivo em computação. O valor de saída do sistema é definido como:

$$x^* = \frac{\sum \mu(x) * x}{\sum \mu(x)}$$

Aqui,  $\Sigma$  denota a soma algébrica de cada área multiplicado pelo centroide de cada figura, sendo o  $x$  o resultado esperado para aquela saída.

**Figura 15 - Resultado da saída do controlador para potência do motor**



**Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 15 é mostrado o resultado para as funções de pertinência truncadas da saída da potência do motor ICE: Baixa, Média, Alta. Como resultado, o valor defuzzificado para a potência do motor é:

$$x^* = \frac{(7,52 * 9,41 + 10,20 * 20,28 + 3,96 * 30,10)}{7,52 + 10,20 + 3,96} = \frac{396,86}{59,79} = 18,31 W$$

### 2.3.5.8 Base de regras

A base de regras *fuzzy* é um conjunto de condicionais e consequentes, o cérebro dos algoritmos de lógica *fuzzy*. As regras, conforme mostrado no Quadro 3, representam o comportamento operacional de um sistema, processo de decisão e pensamentos de um especialista. Portanto, a construção de um sistema de base de regras é muito importante para obter uma correta decisão, sendo assim ideias, conhecimentos, intuições e truques de especialistas são incluídos em um processo de decisão e na base de regras. As regras geralmente são desenvolvidas com base nas características de entrada e saída dos sistemas (ROSS, 2017).

**Quadro 3 - Base de regras para acionamento do ICE**

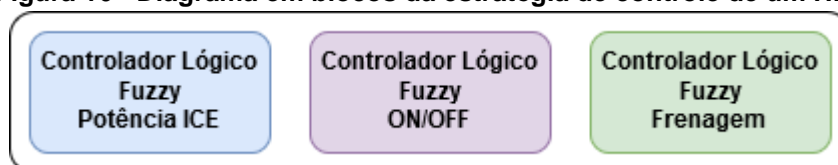
Regra Nº1	<b>Se</b> Torque é EB	<b>e</b> SoC é EB	<b>então</b>	Motor é Ligado
Regra Nº2	<b>Se</b> Torque é EB	<b>e</b> SoC é MB	<b>então</b>	Motor é Ligado
Regra Nº3	<b>Se</b> Torque é EB	<b>e</b> SoC é B	<b>então</b>	Motor é Ligado
Regra Nº4	<b>Se</b> Torque é EB	<b>e</b> SoC é M	<b>então</b>	Motor é Desligado
Regra Nº5	<b>Se</b> Torque é EB	<b>e</b> SoC é A	<b>então</b>	Motor é Desligado
Regra Nº6	<b>Se</b> Torque é EB	<b>e</b> SoC é MA	<b>então</b>	Motor é Desligado
Regra Nº7	<b>Se</b> Torque é EB	<b>e</b> SoC é EA	<b>então</b>	Motor é Desligado
Regra Nº8	<b>Se</b> Torque é MB	<b>e</b> SoC é EB	<b>então</b>	Motor é Ligado
Regra Nº9	<b>Se</b> Torque é MB	<b>e</b> SoC é MB	<b>então</b>	Motor é Ligado
Regra Nº10	<b>Se</b> Torque é MB	<b>e</b> SoC é B	<b>então</b>	Motor é Ligado

**Fonte: Autoria própria.**

### 3 DESENVOLVIMENTO DO TEMA

Um controle de acionamento do motor à combustão está associado com outros controles que atuam em conjunto e não isoladamente. Na Figura 16, é mostrada uma estratégia de controle de um HEV que possui três subcontroladores principais: Controlador Lógico *Fuzzy* para Potência ICE, Controlador Lógico *Fuzzy* para Acionamento ICE e o Controlador Lógico *Fuzzy* de Frenagem Regenerativa (ABDELSALAM; CUI, 2012).

**Figura 16 - Diagrama em blocos da estratégia de controle de um HEV**



Fonte: Adaptado de Abdelsalam e Cui (2012).

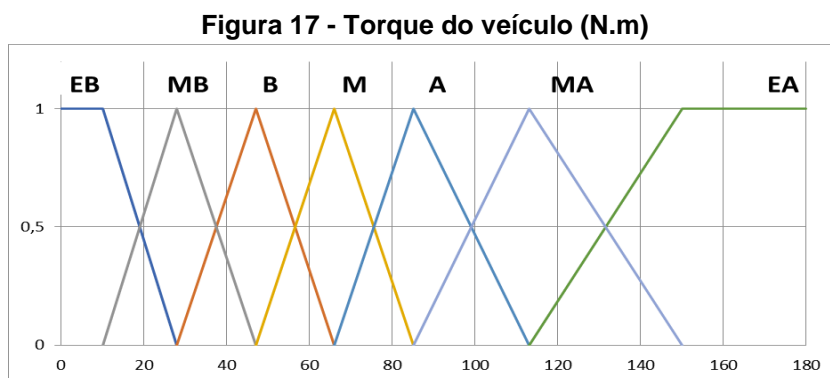
Neste trabalho será tratado somente dois dos três controladores apresentados: O controlador para acionamento e o controlador para determinação da potência do ICE. Para um veículo convencional convertido para uma arquitetura elétrica híbrida seriam os principais. O controle para frenagem regenerativa exige um kit específico de componentes para esta finalidade, mas não essencial.

#### 3.1 ESTRATÉGIA DE ACIONAMENTO DO MOTOR À COMBUSTÃO (ICE)

A estratégia do FLC para ligar/desligar o ICE garante que o estado de carga da bateria (SoC) opere sempre dentro da faixa ideal especificada. Além disso, o motor é acionado quando o torque solicitado nas rodas é maior que o torque disponível dos motores elétricos EVT, independentemente de qualquer que seja o estado de carga da bateria (SoC) (ABDELSALAM; CUI, 2012).

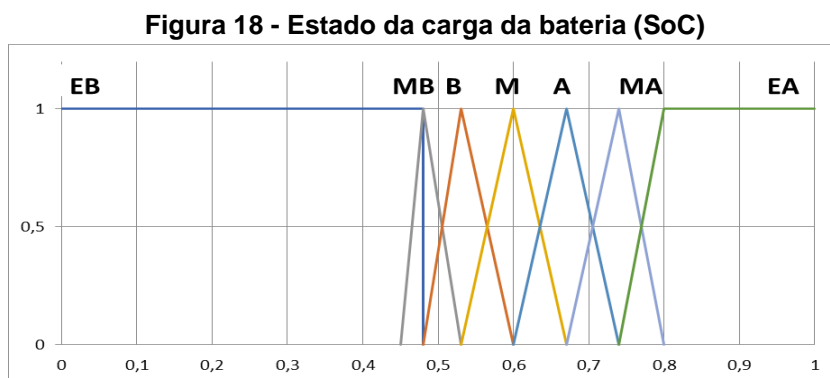
Cada entrada foi determinada e classificada com o objetivo de atender a estratégia de direção proposta, da especificação e operação de cada componente no veículo como um todo. O torque exigido é calculado a partir da velocidade e aceleração do veículo, então foi classificado em sete faixas de operação: {EB; MB; B; M; A; MA; EA} que representam a demanda de torque do veículo desde o valor mínimo

de 0 N.m até o valor máximo de 180 N.m, como mostrado na Figura 17 (ABDELSALAM; CUI, 2012).



Fonte: Adaptado de Abdelsalam e Cui (2012).

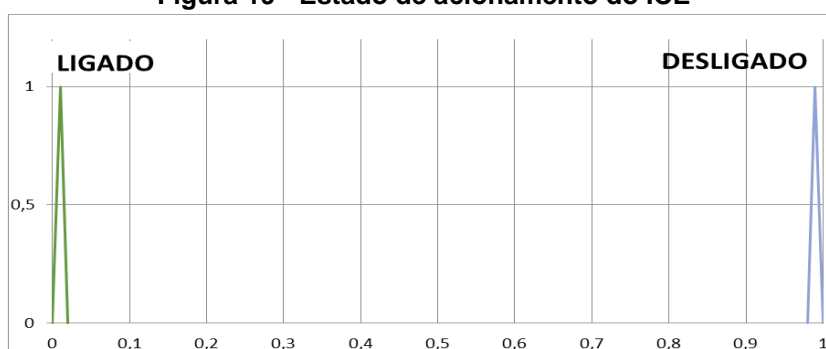
O intervalo determinado para o SoC da bateria é entre 0 (0%) à 1 (100%), a Figura 18 mostra as sete faixas de operação classificadas como: {EB; MB; B; M; A; MA; EA}. O intervalo operacional de 0,45 (45%) até 0,75 (75%) foi dividido em cinco faixas sendo o valor alvo e ser mantido é de 0,6 (60%). As faixas de operação são triangulares assimétricas, muito próximas do valor alvo de 0,6 (60%), dando mais precisão ao controlador (ABDELSALAM; CUI, 2012).



Fonte: Adaptado de Abdelsalam e Cui (2012).

A saída do controlador do ICE é tipo binário (Ligado/Desligado) sendo representados apenas por dois elementos somente {0;1} conforme mostrado na Figura 19. O objetivo é evitar o esgotamento da bateria tendo como base atender a demanda do motorista, assim como para sustentar o SoC em sua faixa alvo.

Figura 19 - Estado de acionamento do ICE



Fonte: Adaptado de Abdelsalam e Cui (2012).

O Quadro 4 mostra a matriz de decisão do controlador lógico *fuzzy* para ligar/desligar o ICE. Ela é composta por suas variáveis de entrada SoC e o torque requisitado do veículo respectivamente e como saída tem-se os estados: Ligado (*ON*) / Desligado (*OFF*).

Quadro 4 - Matriz de decisão para o controlador do motor

Torque (N.m) \ SoC	EB [0,00-0,48]	MB [0,45-0,53]	B [0,48-0,60]	M [0,53-0,67]	A [0,60-0,74]	MA [0,67-0,76]	EA [0,74-1,00]
EB [00-28]	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
MB [10-47]	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
B [28-66]	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF
M [47-85]	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF
A [66-113]	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
MA [85-150]	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
EA [113-170]	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON

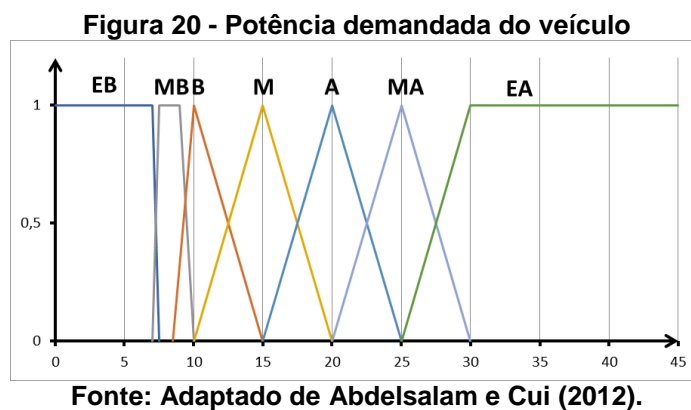
Onde: Ligado (*ON*), Desligado (*OFF*)

Fonte: Adaptado de Abdelsalam e Cui (2012).

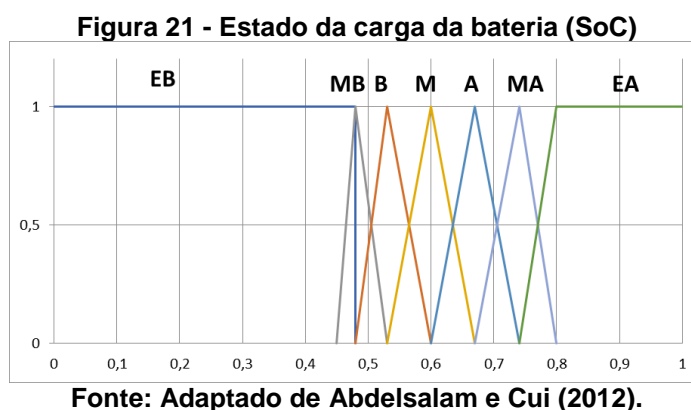
### 3.2 ESTRATÉGIA DE CONTROLE DO MOTOR À COMBUSTÃO (ICE)

A estratégia do FLC do ICE é responsável por garantir a operação do motor em sua região de máxima eficiência. Assim, a potência ótima do motor, como a saída do FLC, é determinada somente de acordo com a potência do veículo e do SoC da bateria, conforme as entradas do controlador. é projetado para otimizar a divisão de energia entre o ICE e a bateria; ao mesmo tempo, para garantir a operação do motor dentro de sua faixa de potência ideal, de 7 kW a 40 kW. Esta potência é suficiente para conduzir o veículo em velocidades de cruzeiro e também para carregar a bateria no modo de condução híbrida (ABDELSALAM; CUI, 2012).

A potência demanda pelo veículo é classificada em {EB; MB; B; M; A; MA; EA} que representam a demanda de potência desde o valor mínimo de 0kW até o valor máximo de 43 kW (Figura 20). A potência operacional do veículo é dividida em cinco áreas com sobreposição a partir de 7 kW a 30 kW (ABDELSALAM; CUI, 2012).

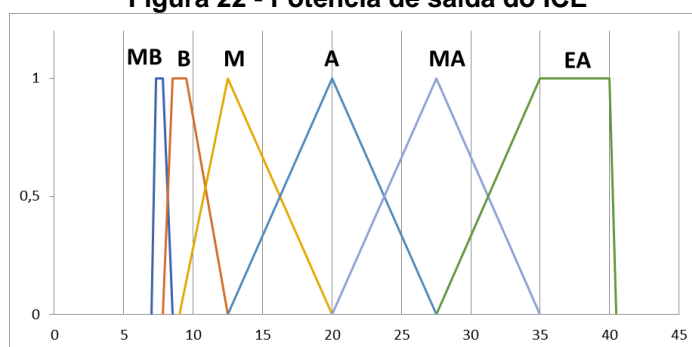


O SoC da bateria é dividido em sete faixas de operação classificadas em {EB; MB; B; M; A; MA; EA}; o intervalo operacional de 0,45 (45%) até 0,75 (75%) foi dividido em cinco faixas sendo o valor alvo a ser mantido é de 0,6 (60%) (Figura 21). As faixas de operação são triangulares assimétricas, assim como no controlador de acionamento do ICE (ABDELSALAM; CUI, 2012).



A potência de saída do ICE é classificada em {MB; B; M; A; MA; EA}, representando a potência do motor desde o valor ideal mínimo de 7 kW até à potência máxima ideal de 40 kW (Figura 22). A sobreposição entre as faixas garante a transição suave dentro da região de operação ideal (ABDELSALAM; CUI, 2012).

Figura 22 - Potência de saída do ICE



Fonte: Adaptado de Abdelsalam e Cui (2012).

O Quadro 5 mostra a matriz de decisão do controlador lógico *fuzzy* de potência do ICE. É composto pelas variáveis de entrada SoC e o potência demandada do veículo e como saída a potência do ICE.

Quadro 5 - Matriz de decisão para o controlador do motor

Pot Veículo (KW) \ SoC	EB [0,00-0,45]	MB [0,45-0,55]	B [0,47-0,60]	M [0,55-0,65]	A [0,60-0,70]	MA [0,65-0,75]	EA [0,75-1,00]
EB [0-7]	B	B	MB	MB	MB	MB	MB
MB [7-10]	M	B	B	B	MB	MB	MB
B [8,5-15]	A	M	MB	B	MB	MB	MB
M [10-20]	A	A	A	M	MB	MB	MB
A [15-25]	MA	MA	MA	M	B	B	B
MA [20-30]	EA	MA	MA	A	M	M	B
EA [25-43]	EA	EA	EA	MA	MA	A	M

Fonte: Adaptado de Abdelsalam e Cui (2012).

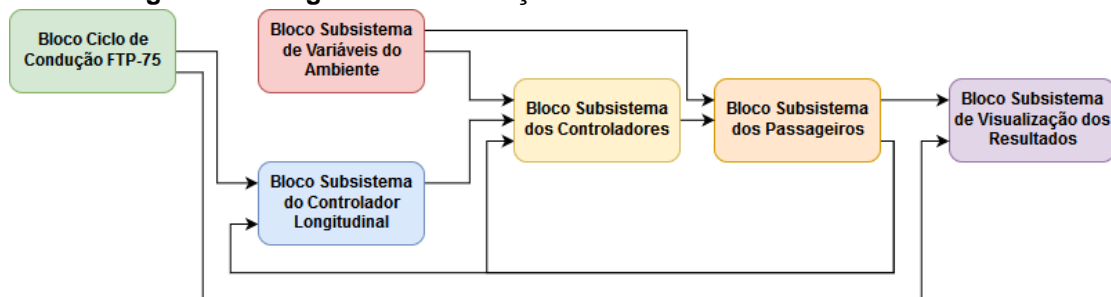
### 3.3 MODELO DE SIMULAÇÃO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO

Para obtenção dos parâmetros de entrada do algoritmo, foi utilizada uma simulação de um modelo HEV completo baseado na arquitetura em paralelo, conforme é mostrado na Figura 23, disponível na ferramenta MATLAB®/Simulink® que possui a seguinte configuração (HEV Input Power-Split, 2018):

- Bateria de níquel-hidreto metálico (NiMH);
- Motores elétricos (EMs) mapeados;
- Motor à combustão interna (ICE) mapeado;
- Algoritmos de controle de trem-de-força associados.



**Figura 23 - Diagrama da simulação dos blocos e subsistemas do HEV**



Fonte: Autoria própria.

Contudo este modelo não é um veículo convencional convertido para uma arquitetura híbrida, mas sim um veículo híbrido puro de fábrica. Ele não é utilizado para comparação, mas sim para obter sinais simulados do Estado de Carga da Bateria (SoC) e Potência Total do Veículo. Na sequência é apresentada uma breve descrição de cada bloco ou subsistema da simulação:

- **Bloco Ciclo de Condução FTP-75:** O ciclo FTP (*Federal Test Procedure*) foi criado pela EPA (*Environmental Protection Agency*) dos EUA, para representar um ciclo de condução com uma etapa de condução urbana, incluindo paradas frequentes e uma etapa de condução em autoestrada. A velocidade média é 34,1 km/h, velocidade máxima é 91 km/h, com um tempo total de 2474 s do ciclo. A saída do bloco é a velocidade longitudinal do veículo selecionada ou especificada (EPA, 2017).
- **Subsistema de Variáveis do Ambiente:** Gera variáveis do ambiente, incluindo o tipo da estrada, velocidade do vento, temperatura e pressão atmosférica.
- **Subsistema do Controlador Longitudinal:** Gera comandos normalizados de aceleração e frenagem com base nas velocidades de *realimentação* e do bloco do ciclo de condução.
- **Subsistema dos Controladores:** Gera comando do módulo de controle do trem-de-força, módulo de controle híbrido e um módulo de controle do motor à combustão (ICE).
- **Subsistema Carro de Passageiros:** Simula um carro de passageiros elétrico híbrido (HEV) que contém subsistemas de trem-de-força, instalações elétricas e motores.
- **Subsistema de Visualização dos Resultados:** Exibe o desempenho do veículo, estado de carga da bateria (SoC), economia de combustível e resultados de emissões.

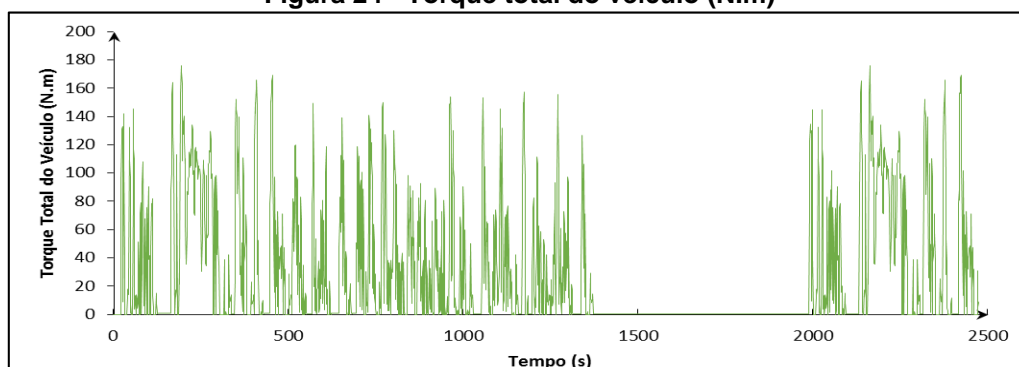
Os sinais utilizados como entrada do algoritmo, estão descritos no Quadro 6.

**Quadro 6 - Sinais do modelo HEV extraídos da simulação**

Sinais do modelo HEV	Interface	Figura
Torque Total do Veículo	Entrada	Figura 24
Estado da Carga da Bateria (SoC)	Entrada	Figura 25
Potência Total do Veículo	Entrada	Figura 26

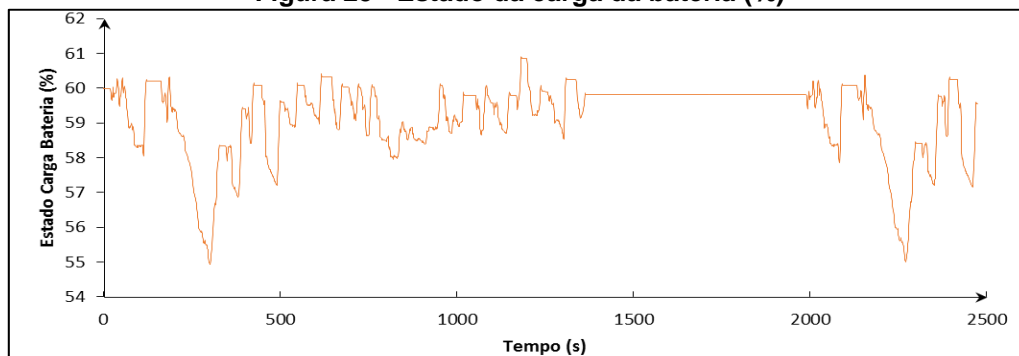
Fonte: Autoria própria.

**Figura 24 - Torque total do veículo (N.m)**



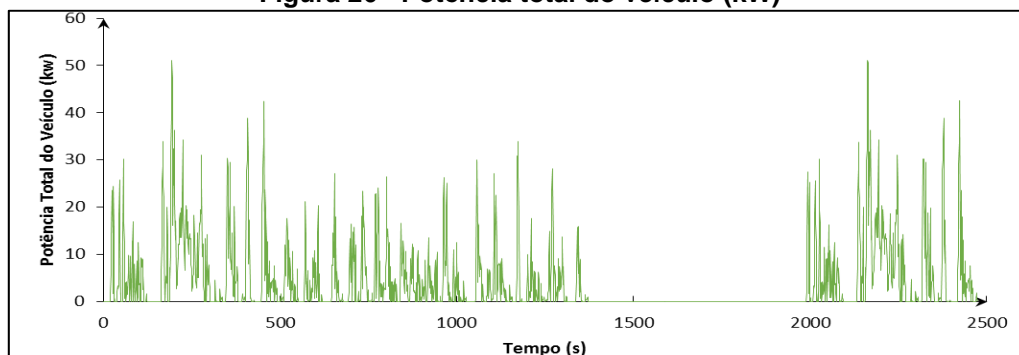
Fonte: Autoria própria.

**Figura 25 - Estado da carga da bateria (%)**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 26 - Potência total do veículo (kW)**



Fonte: Autoria própria.

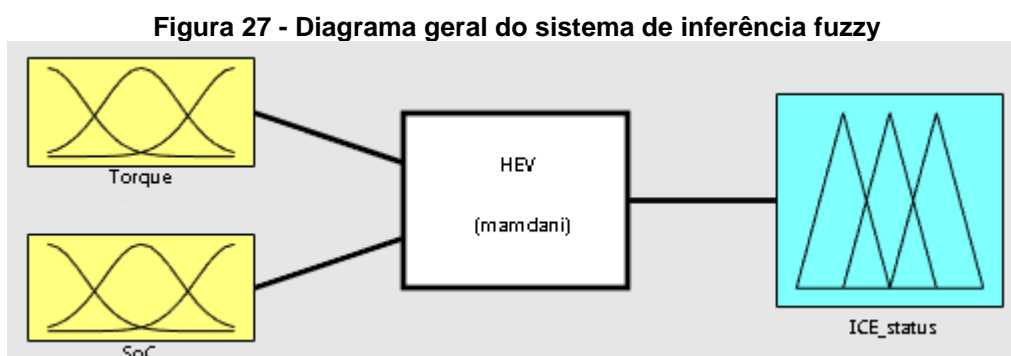
### 3.4 MODELO DE SIMULAÇÃO DO FLC DE ACIONAMENTO DO ICE

O algoritmo proposto por este trabalho tem como elemento central o FLC que, apresentado no Item 0, é composto por um bloco fuzzificador, uma base de regras e um defuzzificador que irá fornecer a decisão tomada pelo controlador. Para que a saída do algoritmo seja validada, ou seja, a sua lógica esteja corretamente escrita, foi utilizada uma ferramenta disponível no MATLAB/Simulink® chamada *Fuzzy Logic Toolbox*®, que possui funções e aplicativos para analisar, projetar e simular sistemas baseados em lógica *fuzzy*. ANEXO, encontra-se o arquivo do sistema de inferência *fuzzy* (FIS) com todas as informações necessárias o que inclui: O tipo de lógica *fuzzy*, controles de entrada e as suas funções de pertinência, controles de saída e suas funções de pertinência, base de regras e os métodos e operações *fuzzy*.

#### 3.4.1 Simulação do Sistema de Inferência Fuzzy

A inferência *fuzzy* é um método que interpreta os valores no vetor de entrada e, com base em regras definidas, atribui valores ao vetor de saída. Os seguintes editores e visualizadores foram utilizados na ferramenta *Fuzzy Logic Toolbox*®:

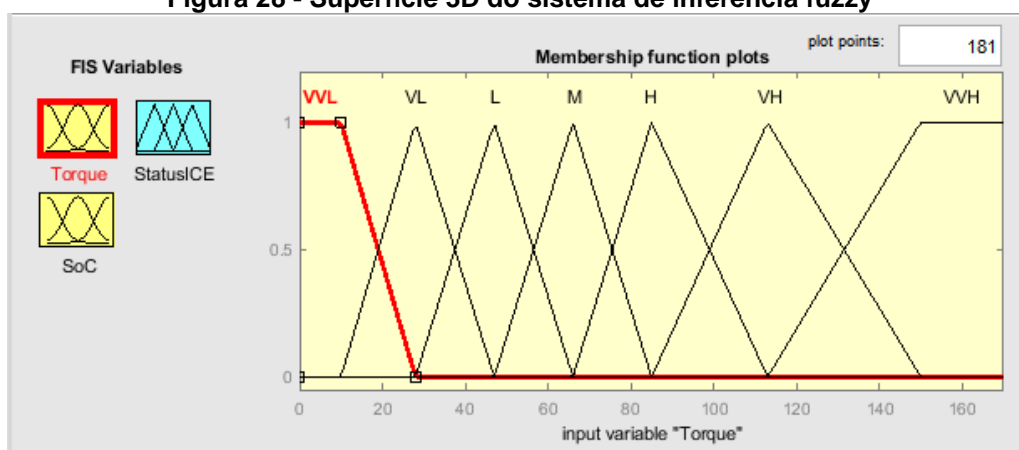
- **Editor FIS:** Exibe informações gerais sobre um sistema de inferência *fuzzy* conforme a Figura 27.



Fonte: MathWorks (2018).

- **Editor de Função de Pertinência:** As funções de pertinência associadas às variáveis de entrada e saída do Sistema de Inferência *Fuzzy* (FIS) são criadas nesta etapa, conforme visto na Figura 28.

Figura 28 - Superfície 3D do sistema de inferência fuzzy



Fonte: MathWorks (2018).

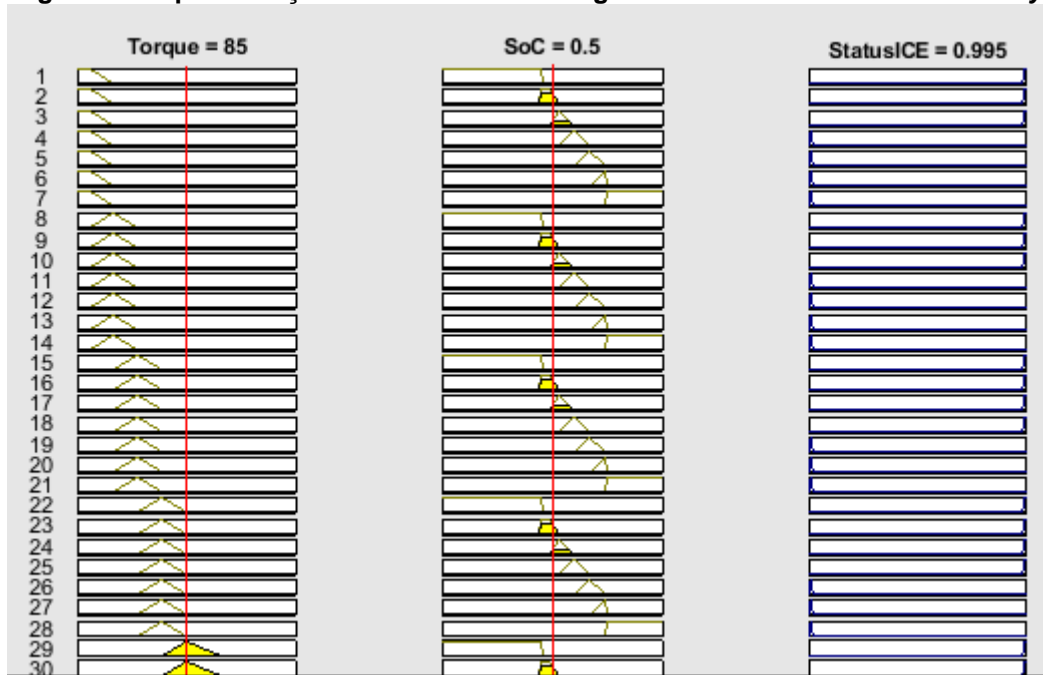
- **Editor de regras:** Visualização e edição da base de regras (Figura 29) do controlador de acionamento do motor. No ANEXO encontra-se a base de regras completa.

Figura 29 - Base de regras do sistema de inferência fuzzy

Fonte: MathWorks (2018).

- **Visualizador de regras:** Visualização do comportamento detalhado do sistema de inferência fuzzy (Figura 30). É possível diagnosticar o comportamento de regras específicas ou estudar o efeito de alterações nas variáveis de entrada do sistema.

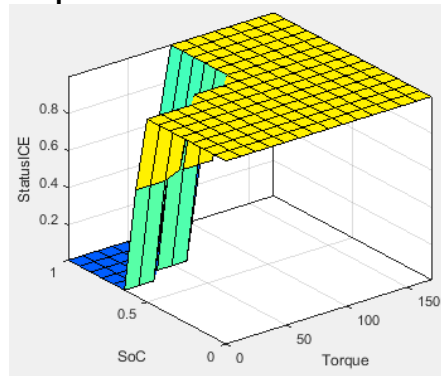
Figura 30 - Apresentação visual da base de regras do sistema de inferência *fuzzy*



Fonte: MathWorks (2018).

- **Visualizador de superfície:** Gera uma superfície 3D a partir das duas variáveis de entrada, Torque do Veículo e Estado da Carga da Bateria (SoC), e a saída do sistema de inferência *fuzzy* (FIS), conforme mostra a Figura 31.

Figura 31 - Superfície 3D do sistema de inferência fuzzy

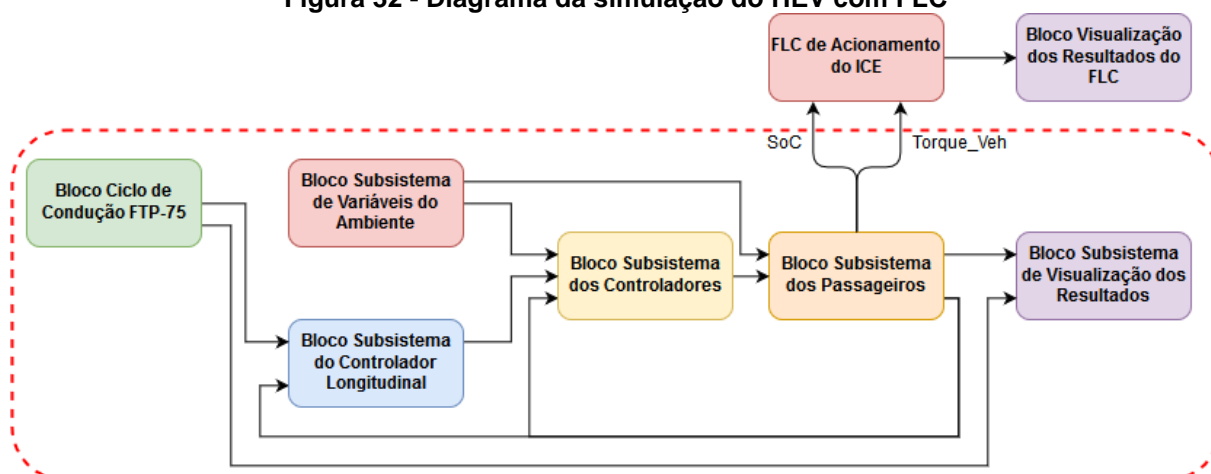


Fonte: MathWorks (2018).

### 3.4.2 Teste do FIS na Simulação do Veículo Elétrico Híbrido

Este controlador foi adicionado na simulação do HEV, conforme visto na, para uso dos sinais do SoC e do Torque Total do Veículo, sem interferir na simulação (Figura 32). O objetivo principal é verificar a saída do FIS, com estes sinais ao longo do tempo, quando ao comando para acionamento do ICE.

Figura 32 - Diagrama da simulação do HEV com FLC



Fonte: Autoria própria.

### 3.5 DESENVOLVIMENTO DA LÓGICA DO CONTROLADOR LÓGICO *FUZZY*

O seu conceito é que ele possa ser integrado ao controlador principal do sistema de gerenciamento e supervisão do fluxo de energia em HEV convertido, sendo assim, foi definido que seria no formato de uma função que, quando declarada, forneça ao controlador principal a decisão de acionar ou não o ICE.

Em programação, função é um grupo de instruções que juntas executam uma tarefa. Uma declaração de função informa ao compilador sobre o nome de uma função, tipo de retorno e parâmetros. Uma função é conhecida com vários nomes, como um método ou uma sub-rotina ou um procedimento, etc. (LIPPMAN; LAJOIE; MOO, 2015).

#### 3.5.1 Descrição do Controlador de Lógica Fuzzy

##### 3.5.1.1 Fuzzificação e pré-tratamento das variáveis de entrada

A etapa de fuzzificação armazena os valores de entrada do SoC, Torque e Potência do Veículo em suas respectivas variáveis e os classifica de acordo com as funções de pertinência do conjunto *fuzzy*. A Tabela 1 mostra todas as funções de pertinência para as variáveis de entrada.

Tabela 1 - Funções de pertinência para variáveis de entrada

SoC das Baterias	Funções de Pertinência {a,b,c,d}	Torque do Veículo	Funções de Pertinência {a,b,c,d}	Potência do Veículo	Funções de Pertinência {a,b,c,d}
EB	[0.00, 0.48]	EB	[00, 28]	EB	[00, 07]
MB	[0.45, 0.53]	MB	[10, 47]	MB	[07, 10]
B	[0.48, 0.60]	B	[28, 66]	B	[8.5, 15]
M	[0.53, 0.67]	M	[47, 85]	M	[10, 20]
A	[0.60, 0.74]	A	[66, 113]	A	[15, 25]
MA	[0.67, 0.76]	MA	[85, 150]	MA	[20, 30]
EA	[0.76, 1.00]	EA	[113, 180]	EA	[25, 43]

Fonte: Autoria própria.

Os condicionais para que a etapa de fuzzificação determine em qual função de pertinência o valor de entrada está contido, são mostrados no Quadro 7. Os condicionais são aplicados a todas as FPs, pois como há áreas de sobreposição entre as mesmas (ver Figura 17 e Figura 18), o valor de entrada pode pertencer a mais de uma FP. Caso ocorra, será determinada qual regra terá maior relevância.

Quadro 7 - Condicionais para fuzzificação das entradas

Condicionais
<i>Se <math>(a \leq SoC \leq b)</math>, então SoC pertence à (FP)</i>
<i>Se <math>(a \leq Torque \leq b)</math>, então Torque pertence à (FP)</i>

Fonte: Autoria própria.

Os formatos definidos das FPs foram triangular e o trapezoidal. Para que fosse possível construí-las graficamente, precisou-se de quatro pontos principais característicos dessas funções. As FPs do SoC, Torque e Potência do veículo e os pontos para construção das funções estão definidos na Tabela 2.

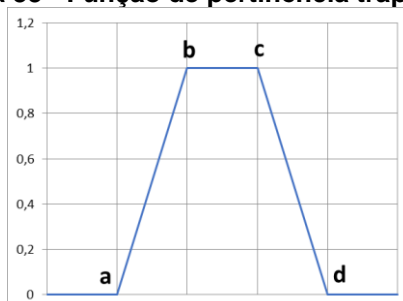
Tabela 2 - Funções de pertinência para o SoC e o torque total do veículo

SoC das Baterias	Funções de Pertinência {a,b,c,d}	Torque do Veículo	Funções de Pertinência {a,b,c,d}	Potência do Veículo	Funções de Pertinência {a,b,c,d}
EB	{0.00,0.00,0.45,0.48}	EB	{0,0,10,28}	EB	{0,7,7,8,5}
MB	{0.45,0.48,0.48,0.53}	MB	{10,28,28,47}	MB	{7, 8.5, 8.5, 10}
B	{0.48,0.53,0.53,0.60}	B	{28,47,47,66}	B	{8.5, 12, 12, 15}
M	{0.53,0.60,0.60,0.67}	M	{47,66,66,85}	M	{12 15 15 20}
A	{0.60,0.67,0.67,0.74}	A	{66,85,85,113}	A	{15, 20, 20, 25}
MA	{0.67,0.74,0.74,0.76}	MA	{85,113,113,150}	MA	{20, 25, 25, 30}
EA	{0.76,0.80,0.80,1.00}	EA	{113,150,150,180}	EA	{25, 30, 43, 43}

Fonte: Autoria própria.

A função trapezoidal foi definida por um limite inferior entre os pontos **a** e **d**, um limite superior entre os pontos **b** e **c**, conforme Figura 33.

**Figura 33 - Função de pertinência trapezoidal**



Fonte: Autoria própria.

Os condicionais para uma função trapezoidal que determinam o valor de  $\mu_A(x)$ , e em que ponto ele se encontra na função de pertinência, estão descritos no Quadro 8.

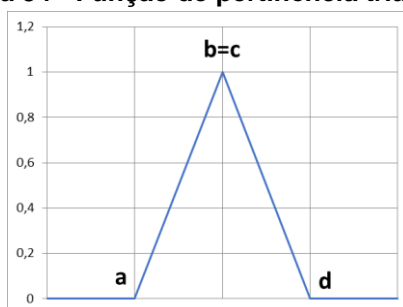
**Quadro 8 - Condicionais para uma função trapezoidal**

Condicionais
Se $(x < a)$ ou $(x > d)$ , então $\mu_A(x)$ é igual a 0
Se $(a \leq x \leq b)$ , então $\mu_A(x)$ é igual a $\frac{x - a}{b - a}$
Se $(b \leq x \leq c)$ , então $\mu_A(x)$ é igual a 1
Se $(c \leq x \leq d)$ , então $\mu_A(x)$ é igual a $\frac{d - x}{d - c}$

Fonte: Autoria própria.

A função triangular foi definida por um limite inferior entre os pontos **a** e **d** e um limite superior onde os pontos **b** e **c** são iguais, conforme Figura 34.

**Figura 34 - Função de pertinência triangular**



Fonte: Autoria própria.

Os condicionais para uma função triangular para determinar o valor de  $\mu_A(x)$ , estão descritos no Quadro 9.



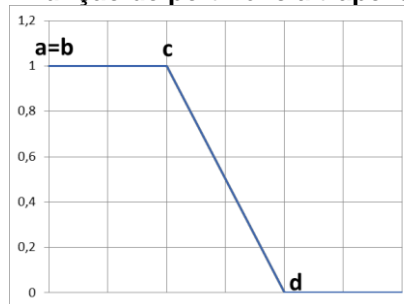
**Quadro 9 - Condiçõais para uma função triangular**

<b>Condiçõais</b>
<i>Se <math>(x &lt; a)</math> ou <math>(x &gt; d)</math>, então <math>\mu_A(x)</math> é igual a 0</i>
<i>Se <math>(a \leq x \leq b)</math>, então <math>\mu_A(x)</math> é igual a <math>\frac{x - a}{b - a}</math></i>
<i>Se <math>(x = b)</math> e <math>(x = c)</math>, então <math>\mu_A(x)</math> é igual a 1</i>
<i>Se <math>(c \leq x \leq d)</math>, então <math>\mu_A(x)</math> é igual a <math>\frac{d - x}{d - c}</math></i>

Fonte: Autoria própria.

Existem dois casos especiais de função trapezoidal, denominados funções do tipo R e do tipo L.

Funções do tipo R com parâmetros  $a = b = -\infty$  (ver Figura 35).

**Figura 35 - Função de pertinência trapezoidal tipo R**

Fonte: Autoria própria.

Os condicionais para uma função trapezoidal do tipo R para determinar o valor de  $\mu_A(x)$ , estão descritos no Quadro 10.

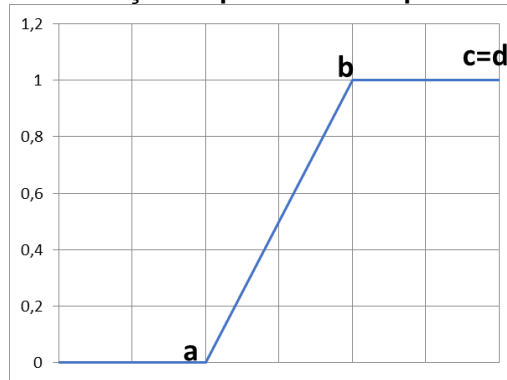
**Quadro 10 - Condiçõais para uma função trapezoidal tipo R**

<b>Condiçõais</b>
<i>Se <math>(x &lt; c)</math>, então <math>\mu_A(x)</math> é igual a 1</i>
<i>Se <math>(c \leq x \leq d)</math>, então <math>\mu_A(x)</math> é igual a <math>\frac{d - x}{d - c}</math></i>
<i>Se <math>(x &gt; d)</math>, então <math>\mu_A(x)</math> é igual a 0</i>

Fonte: Autoria própria.

Funções do tipo L com parâmetros  $c = d = -\infty$  (ver Figura 36).

**Figura 36 - Função de pertinência trapezoidal tipo L**



Fonte: Autoria própria.

Os condicionais para uma função trapezoidal do tipo L para determinar o valor de  $\mu_A(x)$  estão descritos no Quadro 11.

**Quadro 11 - Condicionais para uma função trapezoidal tipo L**

Condicionais
Se $(x < a)$ , então $\mu_A(x)$ é igual a 0
Se $(a \leq x \leq b)$ , então $\mu_A(x)$ é igual a $\frac{x - a}{b - a}$
Se $(x > b)$ , então $\mu_A(x)$ é igual a 1

Fonte: Autoria própria.

Após a fuzzificação, ou seja, quando é determinado em qual função de pertinência cada valor de entrada é classificado, a subfunção do Motor de Inferência verifica quais regras são ativadas para aquele conjunto de valores das entradas.

### 3.5.1.2 Avaliação e inferência da base de regras fuzzy

Abaixo, no Quadro 12, estão dois conjuntos regras extraídas da Base de Regras de um total de 49 (7x7) que se detalhados nos ANEXO e ANEXO.

Quadro 12 - Condicionais da Base de Regras dos FLCs

Condicionais para Acionamento do Motor											
Se	(Torque)	é	EB-	e	(SoC)	é	EB	então	(ICE Status)	é	LIGADO
Se	(Torque)	é	MB	e	(SoC)	é	EA	então	(ICE Status)	é	DESLIGADO
Se	(Torque)	é	B	e	(SoC)	é	A	então	(ICE Status)	é	DESLIGADO
Se	(Torque)	é	EA	e	(SoC)	é	M	então	(ICE Status)	é	DESLIGADO
Condicionais para Potência do Motor											
Se	(Pot. Veh)	é	EB	e	(SoC)	é	EB	então	(Pot. ICE)	é	BAIXO
Se	(Pot. Veh)	é	MB	e	(SoC)	é	EA	então	(Pot. ICE)	é	MUITO BAIXO
Se	(Pot. Veh)	é	MA	e	(SoC)	é	EB	então	(Pot. ICE)	é	EXTR. ALTO
Se	(Pot. Veh)	é	EA	e	(SoC)	é	EA	então	(Pot. ICE)	é	MÉDIO

Fonte: Autoria própria.

### 3.5.1.3 Agregação de saída

Esta etapa consiste em agregar todos os consequentes (graus de pertinência) produzidos pela aplicação de todas as regras ativadas em um único conjunto *fuzzy* que será a função de pertinência da saída, aplicando-se o Método da Soma como descrito no Item 0 No

Quadro 13 tem-se as funções de pertinência para o acionamento e potência do ICE.

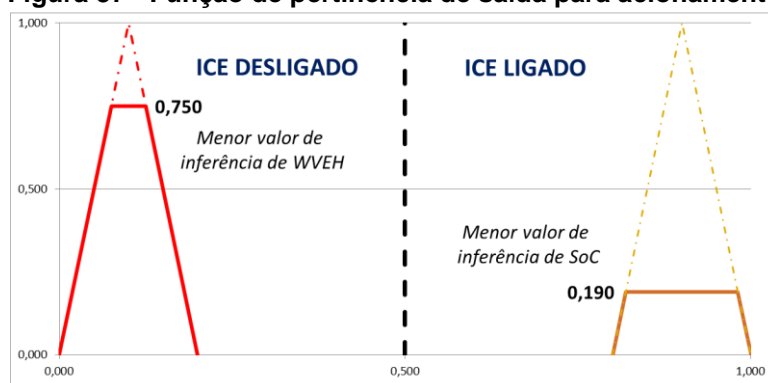
Quadro 13 - Funções de pertinência de acionamento e potência do ICE

Potência do Veículo	Funções de Pertinência {a,b,c,d}	FP de Acionamento	Funções de Pertinência {a,b,c,d}
MB	{-8.5, 7.8, 7.8, 8.5}	LIG	{0.00, 0.01, 0.01, 0.02}
B	{7.8, 8.5, 8.5, 12.5}		
M	{8.5, 12.5, 12.5, 20}		
A	{12.5, 20, 20, 27.5}	DES	{0.98, 0.99, 0.99, 1.00}
MA	{20, 27.5, 27.5, 35}		
EA	{27.5, 35, 40, 43}		

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 37 um exemplo da função de pertinência da saída para um dado valor de SoC e Torque do Veículo.

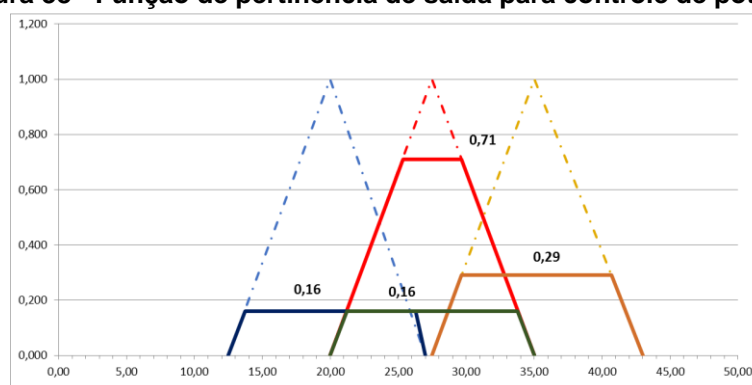
**Figura 37 - Função de pertinência de saída para acionamento**



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 38 um exemplo da função de pertinência da saída para um dado valor de SoC e potência demandada do veículo.

**Figura 38 - Função de pertinência de saída para controle de potência**

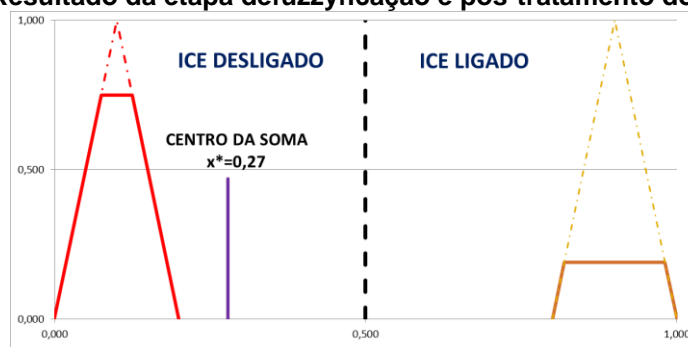


Fonte: Autoria própria.

#### 3.5.1.4 Defuzzificação e pós-tratamento das variáveis de saída

A defuzzificação foi feita aplicando-se o Método do Centro da Soma (CoS), já explicada anteriormente, para calcular um valor nítido (*singleton*) que representa a saída do FLC para acionamento e controle da potência do ICE. Na Figura 39 um exemplo do processo de defuzzificação e pós-tratamento da saída para um dado valor de SoC e Torque do Veículo.

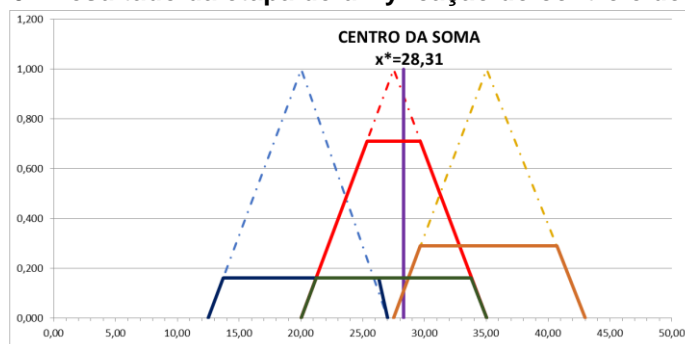
Figura 39 - Resultado da etapa defuzzificação e pós-tratamento do acionamento



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 40 um exemplo do processo de defuzzificação e pós-tratamento da saída para um dado valor de SoC e Torque do Veículo.

Figura 40 - Resultado da etapa defuzzificação do controle de potência



Fonte: Autoria própria.

O valor da saída do FLC para o acionamento é um valor proporcional, cabendo à etapa de pós-processamento interpretar este valor, baseado em um conjunto de condicionais, resultando no comando para acionamento ou não do motor em uma forma binária, onde “0” representa o estado DESLIGADO, e “1” representa o estado LIGADO. Os condicionais da etapa de pós-tratamento definidas são conforme o Quadro 14.

Quadro 14 - Regras da etapa de pós-tratamento e decisão de acionamento

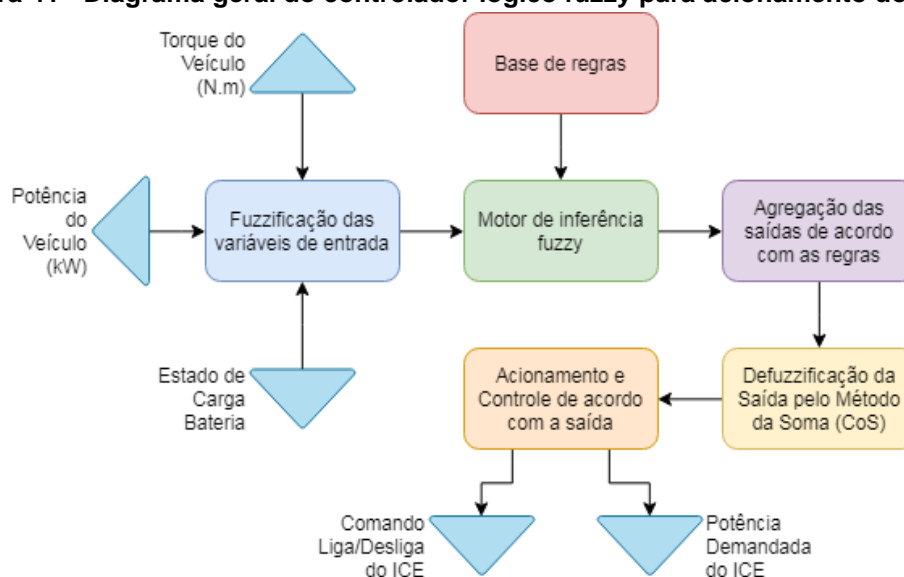
Condicionais			
Se	$0,00 \leq \text{Saída} < 0,50$	Então	ICE <sub>status</sub> é 0
Se	$0,50 \leq \text{Saída} \leq 1,00$	Então	ICE <sub>status</sub> é 1

Fonte: Autoria própria.

### 3.6 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO DO CONTROLADOR LÓGICO FUZZY

Neste item são mostrados vários fluxogramas utilizados para a construção do algoritmo do FLC, utilizando uma representação gráfica, mostrando as diversas ações e decisões que devem ser executadas para que na saída se tenha a decisão de acionar ou não o ICE de acordo com as variáveis de entrada e a estratégia estabelecida. Com base nesses fluxogramas, conforme mostrada na Figura 42 até a Figura 46, é possível construir o algoritmo<sup>5</sup> em qualquer linguagem de programação. Neste trabalho foi utilizada a linguagem C++ que é amplamente difundida e utilizada em sistemas automotivos. Na Figura 41 é mostrado um diagrama geral do FLC com suas etapas principais, a partir do qual foi pode ser desenvolvido e gerado o algoritmo algoritmo do FLC.

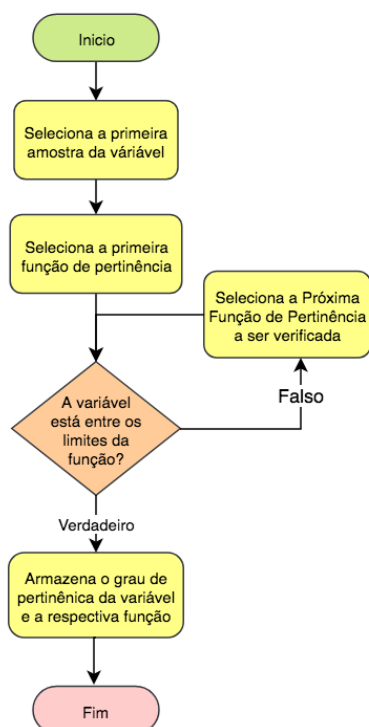
**Figura 41 - Diagrama geral do controlador lógico fuzzy para acionamento do motor**



Fonte: Autoria própria.

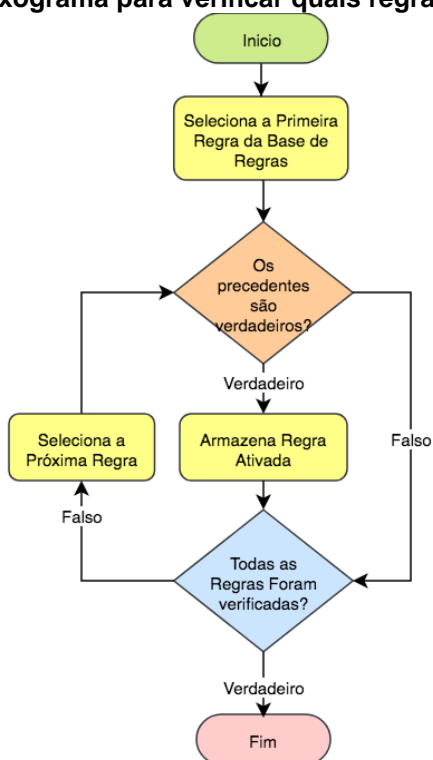
<sup>5</sup> Algoritmo - Sequência finita de instruções bem definidas e não ambíguas, cada uma das quais pode ser executada mecanicamente num período de tempo finito e com uma quantidade de esforço finito.

Figura 42 - Fluxograma para classificação das entradas no conjunto fuzzy



Fonte: Autoria própria.

Figura 43 - Fluxograma para verificar quais regras são ativadas



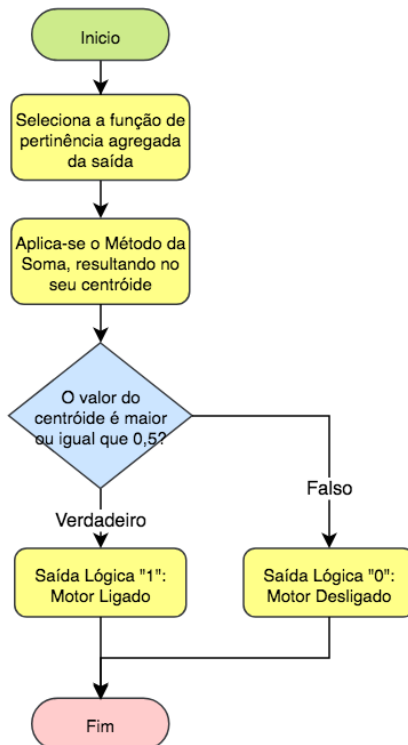
Fonte: Autoria própria.

**Figura 44 - Fluxograma para verificar qual o menor grau de pertinência das variáveis**



Fonte: Autoria própria.

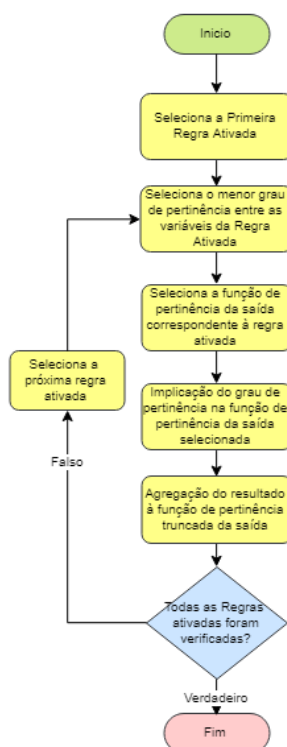
**Figura 45 - Fluxograma para inferência e agregação das saídas de cada regra**



Fonte: Autoria própria.



Figura 46 - Fluxograma para defuzzificação e avaliação da saída



Fonte: Autoria própria.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados do algoritmo de controle para as etapas de fuzzificação, inferência, ativação das regras da base de regras, agregação e defuzzificação. Na sequência é apresentado o resultado geral do controlador segundo a simulação do HEV no ciclo de testes de emissões completo do protocolo FTP-75.

### 4.1 RESULTADOS PARA ETAPA DE FUZZIFICAÇÃO

A etapa de fuzzificação diz qual função e o grau de pertinência das variáveis de entrada. A Tabela 3 mostra os resultados do algoritmo comparados como que é esperado na simulação para a variável do torque do veículo, na Tabela 4 para a variável SoC e na Tabela 5 para variável Potência para um determinado conjunto de valores da entrada. Como existe a sobreposição entre as FPs, ou seja, um valor no eixo x irá inferir em dois valores de no eixo y, a tabela mostra dois graus de pertinência.

**Tabela 3 - Resultados obtidos na etapa de fuzzificação para o torque**

Torque Total do Veículo (N.m)									
Tempo	Valor (N.m)	Função de		Grau de		Função de		Grau de	
		Pertinência #1		Pertinência #1		Pertinência #2		Pertinência #2	
		Esperado	Obtido	Esperado	Obtido	Esperado	Obtido	Esperado	Obtido
32	3,23	EB	EB	1,00	1,00	-	-	-	-
60	97,13	A	A	0,57	0,57	MA	MA	0,43	0,43
87	14,51	EB	EB	0,75	0,75	MB	MB	0,25	0,25
106	0	EB	EB	1	1,00	-	-	-	-
283	95,61	A	A	0,62	0,62	MA	MA	0,38	0,38
449	88,92	A	A	0,86	0,86	MA	MA	0,14	0,14
515	79,83	M	M	0,27	0,27	A	A	0,73	0,73
592	10,82	EB	EB	0,95	0,95	MB	MB	0,05	0,05
813	49,1	B	B	0,89	0,89	M	M	0,11	0,11
1349	71,38	M	M	0,72	0,72	A	A	0,28	0,28
2156	1,34	EB	EB	1	1,00	-	-	-	-
2163	176,04	EA	EA	1,00	1,00	-	-	-	-
2389	0	EB	EB	1	1,00	-	-	-	-
2426	64,68	B	B	0,07	0,07	M	M	0,93	0,93

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 - Resultados obtidos na etapa de fuzzificação para o SoC

Estado de Carga da Bateria									
Tempo	Valor (%)	Função de		Grau de		Função de		Grau de	
		Esperado	Obtido	Esperado	Obtido	Esperado	Obtido	Esperado	Obtido
32	59,85	B	B	0,02	0,02	M	M	0,98	0,98
60	60,05	M	M	0,99	0,99	A	A	0,01	0,01
87	58,68	B	B	0,19	0,19	M	M	0,81	0,81
106	58,35	B	B	0,24	0,24	M	M	0,76	0,76
283	55,6	B	B	0,63	0,63	M	M	0,37	0,37
449	59,94	B	B	0,01	0,01	M	M	0,99	0,99
515	59,34	B	B	0,09	0,09	M	M	0,91	0,91
592	59,53	B	B	0,07	0,07	M	M	0,93	0,93
813	58,05	B	B	0,28	0,28	M	M	0,72	0,72
1349	59,14	B	B	0,12	0,12	M	M	0,88	0,88
2156	60,37	M	M	0,95	0,95	A	A	0,05	0,05
2163	59,41	B	B	0,08	0,08	M	M	0,92	0,92
2389	58,66	B	B	0,19	0,19	M	M	0,81	0,81
2426	59,53	B	B	0,07	0,07	M	M	0,93	0,93

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 - Resultados obtidos na etapa de fuzzificação para a Potência

Potência Demanda do Veículo (kW)									
Tempo	Potência (kW)	Função de		Grau de Pertinência		Função de		Grau de Pertinência	
		Esperado	Obtido	Esperado	Obtido	Esperado	Obtido	Esperado	Obtido
32,00	0,83	EB	EB	0,02	0,02	-	-	0,98	0,98
60,00	12,30	B	B	0,02	0,02	M	M	0,98	0,98
87,00	5,39	EB	EB	0,19	0,19	-	-	0,81	0,81
106,00	0,00	EB	EB	0,24	0,24	-	-	0,76	0,76
283,00	9,99	MB	MB	0,63	0,63	B	B	0,37	0,37
449,00	6,93	EB	EB	0,01	0,01	-	-	0,99	0,99
515,00	11,99	B	B	0,14	0,14	M	M	0,86	0,86
592,00	1,97	MB	MB	0,14	0,14	-	-	0,86	0,86
813,00	7,45	EB	EB	0,29	0,29	MB	MB	0,71	0,71
1349,00	8,99	MB	MB	0,14	0,14	B	B	0,86	0,86
2156,00	0,28	EB	EB	1,00	1,00	-	-	0,00	0,00
2163,00	51,17	EA	EA	0,14	0,14	-	-	0,86	0,86
2389,00	0,00	EB	EB	0,29	0,29	-	-	0,71	0,71
2426,00	4,49	EB	EB	0,14	0,14	-	-	0,86	0,86

Fonte: Autoria própria.

## 4.2 RESULTADOS PARA A ETAPA DE INFERÊNCIA

A etapa de inferência diz quais as regras que foram ativadas para um determinado conjunto de valores da entrada. A Tabela 6 e Tabela 7 mostram quais regras foram ativadas.

**Tabela 6 - Resultados obtidos de regras ativadas para o acionamento do ICE**

Regras Ativadas no FLC				
Tempo(s)	SoC (%)	Torque (N.m)	Esperado	Obtido
32	59,85	3,23	R3,R4	R3,R4
60	60,05	97,13	R32,R33,R39,R40	R32,R33,R39,R40
87	58,68	14,51	R3,R4,R10,R11	R3,R4,R10,R11
106	58,35	0	R3,R4	R3,R4
283	55,6	95,61	R31,R32,R38,R39	R31,R32,R38,R39
449	59,94	88,92	R31,R32,R38,R39	R31,R32,R38,R39
515	59,34	79,83	R24,R25,R31,R32	R24,R25,R31,R32
592	59,53	10,82	R3,R4,R10,R11	R3,R4,R10,R11
813	58,05	49,1	R17,R18,R24,R25	R17,R18,R24,R25
1349	59,14	71,38	R24,R25,R31,R32	R24,R25,R31,R32
2156	60,37	1,34	R45,R5	R45,R5
2163	59,41	176,04	R45,R46	R45,R46
2389	58,66	0	R3,R4	R3,R4
2426	59,53	64,68	R17,R18,R24,R25	R17,R18,R24,R25

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 7 - Resultados obtidos de regras ativadas para a potência do ICE**

Regras Ativadas no FLC				
Tempo(s)	SoC (%)	Potência (kW)	Esperado	Obtido
<b>32,00</b>	59,85	0,83	R3 R4	R3 R4
<b>60,00</b>	60,05	12,30	R32 R33 R39	R32 R33 R39
<b>87,00</b>	58,68	5,39	R3 R4 R10 R10	R3 R4 R10 R10
<b>106,00</b>	58,35	0,00	R3 R4	R3 R4
<b>283,00</b>	55,60	9,99	R31 R32 R38 R38	R31 R32 R38 R38
<b>449,00</b>	59,94	6,93	R31 R32 R38 R38	R31 R32 R38 R38
<b>515,00</b>	59,34	11,99	R24 R25 R31 R31	R24 R25 R31 R31
<b>592,00</b>	59,53	1,97	R3 R4 R10 R10	R3 R4 R10 R10
<b>813,00</b>	58,05	7,45	R17 R18 R24 R24	R17 R18 R24 R24
<b>1349,00</b>	59,14	8,99	R24 R25 R31 R31	R24 R25 R31 R31
<b>2156,00</b>	60,37	0,28	R4 R5	R4 R5
<b>2163,00</b>	59,41	51,17	R45 R46	R45 R46
<b>2389,00</b>	58,66	0,00	R3 R4	R3 R4
<b>2426,00</b>	59,53	4,49	R17 R18 R24 R24	R17 R18 R24 R24

Fonte: Autoria própria.

#### 4.3 RESULTADOS PARA DEFUZZIFICAÇÃO

Cada conjunto de variáveis de entrada ativou um conjunto de regras que foram agregadas, obtendo como resultado uma FP da saída. A Tabela 8 os valores nítidos da saída para o acionamento do ICE e a Tabela 9, os valores da potência demandada do ICE.

**Tabela 8 - Resultados obtidos da agregação da saída para acionamento**

<b>Agregação das Regras Ativadas do FLC</b>				
<b>Tempo(s)</b>	<b>SoC (%)</b>	<b>Torque (N.m)</b>	<b>Esperado</b>	<b>Obtido</b>
32	59,85	3,23	0,03	0,03
60	60,05	97,13	0,99	0,99
87	58,68	14,51	0,28	0,28
106	58,35	0	0,24	0,24
283	55,6	95,61	0,99	0,99
449	59,94	88,92	0,99	0,99
515	59,34	79,83	0,99	0,99
592	59,53	10,82	0,11	0,11
813	58,05	49,1	0,99	0,99
1349	59,14	71,38	0,99	0,99
2156	60,37	1,34	0,01	0,01
2163	59,41	176,04	0,99	0,99
2389	58,66	0	0,20	0,20
2426	59,53	64,68	0,99	0,99

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 9 - Resultados obtidos da agregação da saída para acionamento**

<b>Agregação das Regras Ativadas do FLC</b>				
<b>Tempo(s)</b>	<b>SoC (%)</b>	<b>Potência (kW)</b>	<b>Esperado</b>	<b>Obtido</b>
32	59,85	0,83	0,00	0,00
60	60,05	12,30	10,94	10,94
87	58,68	5,39	0,00	0,00
106	58,35	0,00	0,00	0,00
283	55,6	9,99	12,81	12,81
449	59,94	6,93	2,56	2,56
515	59,34	11,99	13,35	13,35
592	59,53	1,97	0,00	0,00
813	58,05	7,45	3,15	3,15
1349	59,14	8,99	11,06	11,06
2156	60,37	0,28	0,00	0,00
2163	59,41	51,17	30,08	30,08
2389	58,66	0,00	0,00	0,00
2426	59,53	4,49	2,31	2,31

Fonte: Autoria própria.

#### 4.4 RESULTADOS DO ACIONAMENTO DO MOTOR

Depois de calculada a saída nítida, a etapa de pós-processamento, de acordo com os condicionais pré-estabelecidos, deve gerar um valor binário {0 ,1} que é o

comando para acionar ou não o ICE. A Tabela 10 mostra qual a decisão tomada para um determinado conjunto de valores.

**Tabela 10 - Resultados obtidos da agregação das regras ativadas**

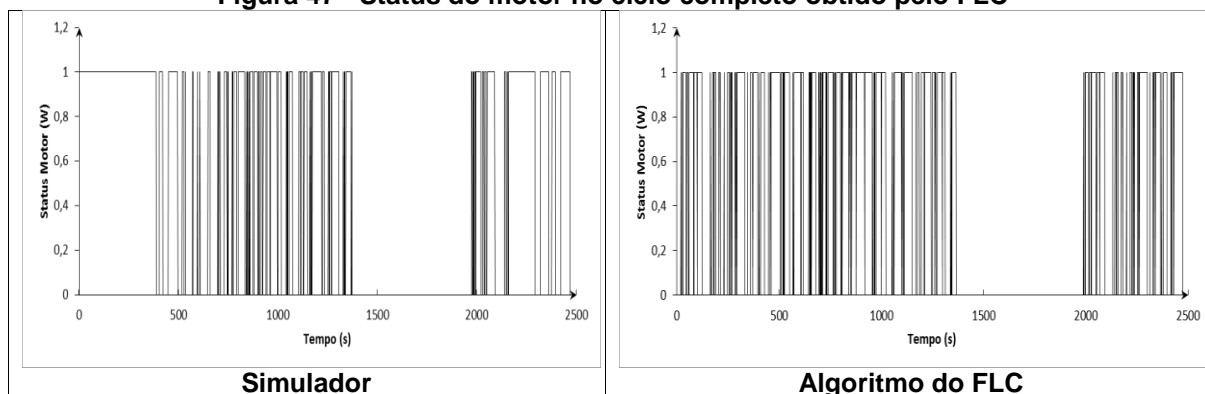
Status do Motor à Combustão (ICE)				
Tempo(s)	SoC (%)	Torque (N.m)	Esperado	Obtido
32	59,85	3,23	OFF	OFF
60	60,05	97,13	ON	ON
87	58,68	14,51	OFF	OFF
106	58,35	0	OFF	OFF
283	55,6	95,61	ON	ON
449	59,94	88,92	ON	ON
515	59,34	79,83	ON	ON
592	59,53	10,82	OFF	OFF
813	58,05	49,1	ON	ON
1349	59,14	71,38	ON	ON
2156	60,37	1,34	OFF	OFF
2163	59,41	176,04	ON	ON
2389	58,66	0	OFF	OFF
2426	59,53	64,68	ON	ON

Fonte: Autoria própria.

#### 4.5 RESULTADO GERAL DO FLC PARA SIMULAÇÃO NO PROTOCOLO FTP-75

Na Figura 47 é mostrado resultado obtido do FLC comparado ao obtido da simulação do ciclo de direção do protocolo FTP-75. É possível visualizar qual decisão foi tomada pelo controlador a cada segundo, sendo o valor “1” para ligado e valor “0” para desligado. Comparando ambos os sinais, os resultados são muito próximos, pois no simulador a estratégia de acionamento é diferente e com outras considerações.

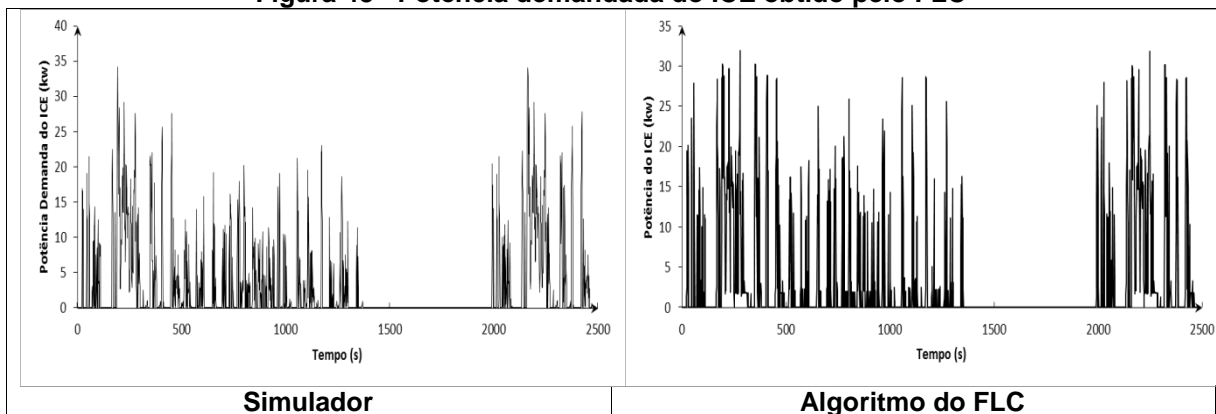
**Figura 47 - Status do motor no ciclo completo obtido pelo FLC**



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 48 é mostrado resultado obtido do FLC para a Potência demanda do ICE comparado ao obtido da simulação. É possível notar que há uma diferença da potência demandada devido às estratégias serem diferentes. Ajustes no FLC buscando resultados mais próximos são necessários.

**Figura 48 - Potência demandada do ICE obtido pelo FLC**



Fonte: Autoria própria.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conversão de veículos convencionais em circulação para uma arquitetura híbrida é uma possibilidade para locais onde o custo de um veículo puramente elétrico ou híbrido de fábrica possui um alto custo e com uma infraestrutura precária. Associando um sistema de propulsão elétrica é possível a redução da quantidade de emissões nocivas ao meio ambiente e à saúde humana, aumento da eficiência energética e o seu uso estimula a expansão do mercado de energias renováveis.

O objetivo deste trabalho foi atingido, que foi a construção de um algoritmo de um controlador de lógica *fuzzy* para um motor à combustão interna (ICE), fornecendo o comando para acionar o ICE e a potência demandada dele. Analisando os resultados, cada etapa do controlador foi verificada com o resultado esperado sendo:

- **Fuzzificação:** os sinais de entrada foram corretamente classificados de acordo com a função de pertinência do conjunto fuzzy de cada variável;
- **Base de Regras e Inferência:** cada regra foi avaliada para cada conjunto de variáveis sendo ativadas somente aquelas que realmente correspondiam aos condicionais pré-estabelecidos;
- **Agregação das Regras Ativadas:** Cada regra ativada teve um grau de inferência em alguma função de pertinência do conjunto fuzzy da saída. Após todas as inferências, foi gerada a função de saída, resultado da agregação dos consequentes idêntica ao simulado.
- **Defuzzificação e pós tratamento:** A partir das funções de saída, foi obtido para cada conjunto de variáveis, um valor nítido que representa aquela função, um para o comando de acionamento e outra para a potência demandada.

No resultado geral do controlador para a simulação do ciclo de teste FTP-75, foi possível verificar que o conjunto de regras baseado na estratégia inicial funcionou de acordo com o esperado tempo um resultado muito próximo ao da saída do veículo simulado. A lógica de programação e a sequências das etapas foram executadas adequadamente dentro dos limites previamente estabelecidos. Contudo, não é possível afirmar sobre economia de combustível e diminuição de emissões, pois, esse controlador, é apenas uma parte da estratégia global de controle de um HEV e outras simulações precisam ser feitas para estas avaliações.



## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, existe uma gama de possibilidades que podem estudadas e desenvolvidas usando como base este trabalho. Pode ser avaliada uma estratégia melhor do controlador buscando a máxima eficiência do uso das baterias e o menor uso do motor à combustão.

No controlador, na etapa de defuzzificação, podem ser considerados outros métodos de obtenção de um valor de saída, descritos neste trabalho, e compara-los entre si e ver qual a influência do método escolhido nos valores de saída do controlador. Inserindo estes dados num programa de simulação como o ADVISOR®, será possível comparar qual método é o mais eficiente com o objetivo proposto.

O algoritmo apresentado pode ser facilmente adaptado, para que também se determine a potência obtida através da frenagem regenerativa, bastando ter um conhecimento em de quais variáveis serão necessárias e aplicar a teoria aqui apresentada sobre lógica *fuzzy*, controladores, assim como as estratégias para construção da base de regras.

Os veículos elétricos e híbridos já são o futuro entre os meios de transporte para atender uma demanda global e urgente de redução de emissões e uso de recursos naturais, como o petróleo e seus derivados, por exemplo. Adicionar a esse cenário a possibilidade de dar sobrevida aos veículos convencionais em circulação transformando-os em veículos híbridos ou até elétricos contribuiria para o atingimento de metas legais dando a possibilidade de uma sociedade mais sustentável sem comprometer as futuras gerações.

## REFERÊNCIAS

ABDELSALAM, Abdelsalam A.; CUI, Shumei. **Fuzzy logic global power management strategy for hev based on permanent magnet-dual mechanical port machine**. 7th International Power Electronics and Motion Control Conference. Harbin, China, 2-5 jun. 2012. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6258963/authors#authors>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

AFDC. **Hybrid and plug-in electric vehicle conversions**. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy, Alternative Fuels Data Center (AFDC), 2018. Disponível em: <[https://afdc.energy.gov/vehicles/electric\\_conversions.html](https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_conversions.html)>. Acesso em: 05 nov. 2018.

ALTAS, I. H. **Fuzzy logic control in energy systems**. London: The Institution of Engineering and Technology, 2017.

ALTIGREEN. **ALTIGREEN**: Drive electric. Copyright© 2013-2018 Altigreen Propulsion Labs Pvt. Ltd., 23 nov. 2018. Disponível em: <<http://altigreen.in/>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

AT. **ALTe Technologies (AT)**: Hybrid electric vehicles. Copyright© ALTe Technologies, 2018. Disponível em: <<https://www.altellc.com>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

BECK, Raul F. **A ascensão dos elétricos**: Automóveis movidos a eletricidade deverão representar 16% da frota mundial até 2030. Revista Pesquisa FAPESP, ed. 258, ago. 2017. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2017/08/15/a-ascensao-dos-eletricos/>>. Acesso em: 17 nov. 2018.

CARTOQ. **Ten types of people who should buy petrol cars over diesel**. Copyright© CarToq, publicado em: 23 nov. 2018. Disponível em: <<https://www.cartoq.com/ten-types-of-people-who-should-buy-petrol-cars-over-diesel/>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

CCW. **Complete Coach Works (CCW)**. Copyright© Complete Coach Works, 2018. Disponível em: <<https://completecoach.com/about-us/>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

CHEN, G.; PHAM, T. T. **Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems**. New York: CRC Press, 2000.

CM. **Hybrid electric vehicle conversion kit market to grow at a CAGR of 20.52% by 2021**: Research and markets. Climate Samurai (CM), publicado em: 13 fev. 2018. Disponível em: <<http://www.climatesamurai.com/electric-vehicles/hybrid-electric-vehicle-conversion-kit-market-to-grow-at-a-cagr-of-20-52-by-2021-research-and-markets/>>. Acesso em: 07 nov. 2018.

CNT. **Anuário CNT do transporte 2018**: Estatísticas consolidadas. Confederação Nacional do Transporte (CNT), Brasília, 2017.

COELHO, José Mauro. **Impacto dos veículos elétricos no planejamento energético brasileiro**: Setor de combustíveis fósseis. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Rio de Janeiro, apresentação realizada em: 24 mai. 2017. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-244/topico-252/EPE\\_CADERNO%20FGV%20ENERGIA%20CARROS%20ELETRICOS\\_JOSE%20MAURO\\_2017\\_2405.pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-244/topico-252/EPE_CADERNO%20FGV%20ENERGIA%20CARROS%20ELETRICOS_JOSE%20MAURO_2017_2405.pdf)>. Acesso em: 05 nov. 2018.

CROLLA, D.; et al. **Encyclopedia of Engineering Automotive**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2015.

DCONAMA. **Código de Trânsito Brasileiro**. Ministério do Meio Ambiente, Departamento de Apoio ao Conselho Nacional do Meio Ambiente (DCONAMA), 2018. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

DENATRAN. **Conselho Nacional de Trânsito**. Ministério da Infraestrutura, Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), 2018. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/index.php/contran>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

ECMT. **Electric vehicles**. European Commission: Mobility and Transport (ECMT), 2018. Disponível em: <[https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/vehicles/road/electric\\_en](https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/vehicles/road/electric_en)>. Acesso em: 10 nov. 2018.

EEA. **European Environment Agency (EEA)**. Copyright© European Environment Agency, 2018. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

EESI. **Beneficial electrification**. Copyright© Environmental and Energy Study Institute (EESI), 2018b. Disponível em: <<https://www.eesi.org/projects/electrification>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

EESI. **Fossil fuels**. Copyright© Environmental and Energy Study Institute (EESI), 2018a. Disponível em: <<https://www.eesi.org/topics/fossil-fuels/description>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

EPA. **Greenhouse gas emissions**. United States Environmental Protection Agency (EPA), última alteração em 13 abr. 2017. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>>. Acesso em: 07 nov. 2018.

IM. **Ian Motion (IM)**. Copyright© Ian Motion, 2018. Disponível em: <<https://www.ian-motion.com/en/>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

JAGER, R. **Fuzzy logic in control**. Mekelweg: Thesis Technische Universiteit Delft., 1995.

KAUR, A.; KAUR, A. **Comparison of mamdani-type and sugeno-type fuzzy inference systems for air conditioning system**. International Journal of Soft Computing and Engineering, v. 2, n. 2, mai. 2012. p. 2231-2307. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/2b34/439936ca7c74ab852531299a8e471860fc2e.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

LARSEN, P. M. **Industrial applications of fuzzy logic control**. International Journal of Man-Machine Studies, v. 12, n. 1, jan. 1980, 1980. p. 3-10. Disponível em: <p. 2231-2307>. Acesso em: 14 nov. 2018.

LEE, C. C. **Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller**. II. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 20, n. 2, mar.-abr. 1990. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/52552>>. Acesso em: 14 nov. 2018.

LEITMAN, S.; BRANT, B. **Build your own electric vehicle**. New York: The McGraw-Hill Companies, 2009.

LIPPMAN, S. B.; LAJOIE, J.; MOO, B. E. **C++ primer**. Massachusetts: Addison Wesley, 2015.

LIU, W. **Hybrid electric vehicle system modeling and control**. Hoboken: 2. ed. John Wiley & Sons Ltd, 2017.

LO, Edward W. C. **Review on the configurations of hybrid electric vehicles**. 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA), Hong Kong, mai. 2009. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5228600/>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

MAMDANI, E. H. **Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant**. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, v. 121, n. 12, p. 1585-1588, dez. 1974. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5250910/>>. Acesso em: 14 nov. 2018.

MATHWORKS. **What is fuzzy logic?** Copyright© 1994-2018 The MathWorks, Inc. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/fuzzy/what-is-fuzzy-logic.html>>. Acesso em: 30 nov. 2018.

MI, C.; MASRUR, M. A. **Hybrid electric vehicles: Principles and applications with practical perspectives**. Hoboken: 2. ed. John Wiley & Sons Ltd, 2017.

MURPHEY, Yi L. **Intelligent vehicle power management: An Overview**. In: Studies in Computational Intelligence. Berlin: Springer-Verlag, 2008.

ONORI, S.; SERRAO, L.; RIZZONI, G. **Hybrid electric vehicles energy management strategies**. London: Springer, 2016.

PISTOIA, G. **Electric and hybrid vehicles: Power sources, models, sustainability, infrastructure and the market**. Oxford: Elsevier, 2010.

ROBERTS, D. **The world's largest car market just announced an imminent end to gas and diesel cars: A romp through recent, remarkable news about electric vehicles in China and beyond**. Copyright© 2018 Vox Media, Inc., alterado em: 13 set. 2017. Disponível em: <<https://www.vox.com/energy-and-environment/2017/9/13/16293258/ev-revolution>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2017.

SAMANTA, D. **Soft computing**. Copyright© Dr. Debasis Samanta, 2018. Disponível em: <<http://cse.iitkgp.ac.in/~dsamanta/courses/sca/index.html>>. Acesso em: 05 nov. 2018.

SARI, Wahyuni E.; et al. **State of charge estimation of Lithium Polymer battery using ANFIS and IT2FLS**. 2nd International Conference on Science and Technology-Computer (ICST), Yogyakarta, mar. 2016, p. 50-55. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7877346/>>. Acesso em: 07 nov. 2018.

SINDIPEÇAS. **Relatório da frota circulante 2018**. Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores (SINDIPEÇAS) e Associação Brasileira da Indústria de Autopeças (ABIPEÇAS), São Paulo, 2018. Disponível em : <[http://automotivebusiness.com.br/abinteligencia/pdf/R\\_Frota\\_Circulante\\_2018.pdf](http://automotivebusiness.com.br/abinteligencia/pdf/R_Frota_Circulante_2018.pdf)>. Acesso em: 05 nov. 2018.

SPDE. **Resenha energética brasileira 2018: Ano base 2017**. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Ministério de Minas e Energia, Departamento de Informações e Estudos Energéticos, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético (SPDE), 2018. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Imprensa-e-Midias/Documents/Resenha%20Energ%C3%A9tica%202018%20-MME.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2018.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. **Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. SMC-15, n. 1, 1985. p. 116-132. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6313399>>. Acesso em: 17 nov. 2018.

TECHNAVIO. **Global hybrid electric vehicle conversion kit market 2017-2021**. Copyright © 2007-2018 Infiniti Research Limited, publicado em: dez. 2017. Disponível em: <<https://www.technavio.com/report/global-hybrid-electric-vehicle-conversion-kit-market>>. Acesso em: 05 nov. 2018.

TÓTH-LAUFER, E.; TAKÁCS, M. **The effect of aggregation and defuzzification method selection on the risk level calculation**. 10th IEEE Jubilee International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics. Herl'any: [s.n.]. 2012. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6208943>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

TSUKAMOTO, Y. **An approach to fuzzy reasoning method**. Advances in Fuzzy Set Theory and Applications, Amsterdam, 1977.

UCS. **The hidden costs of fossil fuels**: The true costs of coal, natural gas, and other fossil fuels aren't always obvious - but their impacts can be disastrous. Copyright© Union of Concerned Scientists (UCS), artigo revisado em: 30 ago. 2016. Disponível em: <<https://www.ucsusa.org/clean-energy/coal-and-other-fossil-fuels/hidden-cost-of-fossils#.XD9s802WxCo>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

XL. **XL Technology**: How it works. Copyright© 2018 XL. Disponível em: <<https://www.xlfleet.com/content/technology/>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets**. Information and control, v. 8, n. 3, jun. 1965. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001999586590241X>>. Acesso em: 30 nov. 2018.

ZHANG, R.; PHILLIS, Yannis A.; KOUIKOGLU, Vassilis S. **Fuzzy control of queuing systems**. London: Springer Science & Business Media, 2005.

ZHANG, X.; NI, C. **Vehicle power management**: Modeling, control and optimization. London: Springer, 2011.

ZM. **Zelectric Motors (ZM)**. Copyright© Zelectric Motors, 2018. Disponível em: <<http://www.zelectricmotors.com>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

## ANEXO A: BASE DE REGRAS PARA O ACIONAMENTO DO MOTOR

Regra Nº1	<b>Se</b>	Torque	é	EB	<b>e</b>	SoC	é	EB	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº2	<b>Se</b>	Torque	é	EB	<b>e</b>	SoC	é	MB	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº3	<b>Se</b>	Torque	é	EB	<b>e</b>	SoC	é	B	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº4	<b>Se</b>	Torque	é	EB	<b>e</b>	SoC	é	M	<b>então</b>	Motor	é	Desligado
Regra Nº5	<b>Se</b>	Torque	é	EB	<b>e</b>	SoC	é	A	<b>então</b>	Motor	é	Desligado
Regra Nº6	<b>Se</b>	Torque	é	EB	<b>e</b>	SoC	é	MA	<b>então</b>	Motor	é	Desligado
Regra Nº7	<b>Se</b>	Torque	é	EB	<b>e</b>	SoC	é	EA	<b>então</b>	Motor	é	Desligado
Regra Nº8	<b>Se</b>	Torque	é	MB	<b>e</b>	SoC	é	EB	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº9	<b>Se</b>	Torque	é	MB	<b>e</b>	SoC	é	MB	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº10	<b>Se</b>	Torque	é	MB	<b>e</b>	SoC	é	B	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº11	<b>Se</b>	Torque	é	MB	<b>e</b>	SoC	é	M	<b>então</b>	Motor	é	Desligado
Regra Nº12	<b>Se</b>	Torque	é	MB	<b>e</b>	SoC	é	A	<b>então</b>	Motor	é	Desligado
Regra Nº13	<b>Se</b>	Torque	é	MB	<b>e</b>	SoC	é	MA	<b>então</b>	Motor	é	Desligado
Regra Nº14	<b>Se</b>	Torque	é	MB	<b>e</b>	SoC	é	EA	<b>então</b>	Motor	é	Desligado
Regra Nº15	<b>Se</b>	Torque	é	B	<b>e</b>	SoC	é	EB	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº16	<b>Se</b>	Torque	é	B	<b>e</b>	SoC	é	MB	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº17	<b>Se</b>	Torque	é	B	<b>e</b>	SoC	é	B	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº18	<b>Se</b>	Torque	é	B	<b>e</b>	SoC	é	M	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº19	<b>Se</b>	Torque	é	B	<b>e</b>	SoC	é	A	<b>então</b>	Motor	é	Desligado
Regra Nº20	<b>Se</b>	Torque	é	B	<b>e</b>	SoC	é	MA	<b>então</b>	Motor	é	Desligado
Regra Nº21	<b>Se</b>	Torque	é	B	<b>e</b>	SoC	é	EA	<b>então</b>	Motor	é	Desligado
Regra Nº22	<b>Se</b>	Torque	é	M	<b>e</b>	SoC	é	EB	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº23	<b>Se</b>	Torque	é	M	<b>e</b>	SoC	é	MB	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº24	<b>Se</b>	Torque	é	M	<b>e</b>	SoC	é	B	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº25	<b>Se</b>	Torque	é	M	<b>e</b>	SoC	é	M	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº26	<b>Se</b>	Torque	é	M	<b>e</b>	SoC	é	A	<b>então</b>	Motor	é	Desligado
Regra Nº27	<b>Se</b>	Torque	é	M	<b>e</b>	SoC	é	MA	<b>então</b>	Motor	é	Desligado
Regra Nº28	<b>Se</b>	Torque	é	M	<b>e</b>	SoC	é	EA	<b>então</b>	Motor	é	Desligado
Regra Nº29	<b>Se</b>	Torque	é	A	<b>e</b>	SoC	é	EB	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº30	<b>Se</b>	Torque	é	A	<b>e</b>	SoC	é	MB	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº31	<b>Se</b>	Torque	é	A	<b>e</b>	SoC	é	B	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº32	<b>Se</b>	Torque	é	A	<b>e</b>	SoC	é	M	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº33	<b>Se</b>	Torque	é	A	<b>e</b>	SoC	é	A	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº34	<b>Se</b>	Torque	é	A	<b>e</b>	SoC	é	MA	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº35	<b>Se</b>	Torque	é	A	<b>e</b>	SoC	é	EA	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº36	<b>Se</b>	Torque	é	MA	<b>e</b>	SoC	é	EB	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº37	<b>Se</b>	Torque	é	MA	<b>e</b>	SoC	é	MB	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº38	<b>Se</b>	Torque	é	MA	<b>e</b>	SoC	é	B	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº39	<b>Se</b>	Torque	é	MA	<b>e</b>	SoC	é	M	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº40	<b>Se</b>	Torque	é	MA	<b>e</b>	SoC	é	A	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº41	<b>Se</b>	Torque	é	MA	<b>e</b>	SoC	é	MA	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº42	<b>Se</b>	Torque	é	MA	<b>e</b>	SoC	é	EA	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº43	<b>Se</b>	Torque	é	EA	<b>e</b>	SoC	é	EB	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº44	<b>Se</b>	Torque	é	EA	<b>e</b>	SoC	é	MB	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº45	<b>Se</b>	Torque	é	EA	<b>e</b>	SoC	é	B	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº46	<b>Se</b>	Torque	é	EA	<b>e</b>	SoC	é	M	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº47	<b>Se</b>	Torque	é	EA	<b>e</b>	SoC	é	A	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº48	<b>Se</b>	Torque	é	EA	<b>e</b>	SoC	é	MA	<b>então</b>	Motor	é	Ligado
Regra Nº49	<b>Se</b>	Torque	é	EA	<b>e</b>	SoC	é	EA	<b>então</b>	Motor	é	Ligado

Legenda: Extremamente Baixo (EB), Muito Baixo(MB), Baixo (B), Médio (M), Alto (A), Muito Alto (MA), Extremamente Baixo (EB).



## ANEXO B: BASE DE REGRAS PARA A POTÊNCIA DO MOTOR

Regra Nº1	Se	Pot Veh	é	EB	e	SoC	é	EB	então	Pot ICE	é	B
Regra Nº2	Se	Pot Veh	é	EB	e	SoC	é	MB	então	Pot ICE	é	B
Regra Nº3	Se	Pot Veh	é	EB	e	SoC	é	B	então	Pot ICE	é	MB
Regra Nº4	Se	Pot Veh	é	EB	e	SoC	é	M	então	Pot ICE	é	MB
Regra Nº5	Se	Pot Veh	é	EB	e	SoC	é	A	então	Pot ICE	é	MB
Regra Nº6	Se	Pot Veh	é	EB	e	SoC	é	MA	então	Pot ICE	é	MB
Regra Nº7	Se	Pot Veh	é	EB	e	SoC	é	EA	então	Pot ICE	é	MB
Regra Nº8	Se	Pot Veh	é	MB	e	SoC	é	EB	então	Pot ICE	é	M
Regra Nº9	Se	Pot Veh	é	MB	e	SoC	é	MB	então	Pot ICE	é	B
Regra Nº10	Se	Pot Veh	é	MB	e	SoC	é	B	então	Pot ICE	é	B
Regra Nº11	Se	Pot Veh	é	MB	e	SoC	é	M	então	Pot ICE	é	B
Regra Nº12	Se	Pot Veh	é	MB	e	SoC	é	A	então	Pot ICE	é	MB
Regra Nº13	Se	Pot Veh	é	MB	e	SoC	é	MA	então	Pot ICE	é	MB
Regra Nº14	Se	Pot Veh	é	MB	e	SoC	é	EA	então	Pot ICE	é	MB
Regra Nº15	Se	Pot Veh	é	B	e	SoC	é	EB	então	Pot ICE	é	A
Regra Nº16	Se	Pot Veh	é	B	e	SoC	é	MB	então	Pot ICE	é	M
Regra Nº17	Se	Pot Veh	é	B	e	SoC	é	B	então	Pot ICE	é	M
Regra Nº18	Se	Pot Veh	é	B	e	SoC	é	M	então	Pot ICE	é	B
Regra Nº19	Se	Pot Veh	é	B	e	SoC	é	A	então	Pot ICE	é	MB
Regra Nº20	Se	Pot Veh	é	B	e	SoC	é	MA	então	Pot ICE	é	MB
Regra Nº21	Se	Pot Veh	é	B	e	SoC	é	EA	então	Pot ICE	é	MB
Regra Nº22	Se	Pot Veh	é	M	e	SoC	é	EB	então	Pot ICE	é	A
Regra Nº23	Se	Pot Veh	é	M	e	SoC	é	MB	então	Pot ICE	é	A
Regra Nº24	Se	Pot Veh	é	M	e	SoC	é	B	então	Pot ICE	é	A
Regra Nº25	Se	Pot Veh	é	M	e	SoC	é	M	então	Pot ICE	é	M
Regra Nº26	Se	Pot Veh	é	M	e	SoC	é	A	então	Pot ICE	é	MB
Regra Nº27	Se	Pot Veh	é	M	e	SoC	é	MA	então	Pot ICE	é	MB
Regra Nº28	Se	Pot Veh	é	M	e	SoC	é	EA	então	Pot ICE	é	MB
Regra Nº29	Se	Pot Veh	é	A	e	SoC	é	EB	então	Pot ICE	é	MA
Regra Nº30	Se	Pot Veh	é	A	e	SoC	é	MB	então	Pot ICE	é	MA
Regra Nº31	Se	Pot Veh	é	A	e	SoC	é	B	então	Pot ICE	é	MA
Regra Nº32	Se	Pot Veh	é	A	e	SoC	é	M	então	Pot ICE	é	M
Regra Nº33	Se	Pot Veh	é	A	e	SoC	é	A	então	Pot ICE	é	B
Regra Nº34	Se	Pot Veh	é	A	e	SoC	é	MA	então	Pot ICE	é	B
Regra Nº35	Se	Pot Veh	é	A	e	SoC	é	EA	então	Pot ICE	é	B
Regra Nº36	Se	Pot Veh	é	MA	e	SoC	é	EB	então	Pot ICE	é	EA
Regra Nº37	Se	Pot Veh	é	MA	e	SoC	é	MB	então	Pot ICE	é	MA
Regra Nº38	Se	Pot Veh	é	MA	e	SoC	é	B	então	Pot ICE	é	MA
Regra Nº39	Se	Pot Veh	é	MA	e	SoC	é	M	então	Pot ICE	é	A
Regra Nº40	Se	Pot Veh	é	MA	e	SoC	é	A	então	Pot ICE	é	M
Regra Nº41	Se	Pot Veh	é	MA	e	SoC	é	MA	então	Pot ICE	é	M
Regra Nº42	Se	Pot Veh	é	MA	e	SoC	é	EA	então	Pot ICE	é	B
Regra Nº43	Se	Pot Veh	é	EA	e	SoC	é	EB	então	Pot ICE	é	EA
Regra Nº44	Se	Pot Veh	é	EA	e	SoC	é	MB	então	Pot ICE	é	EA
Regra Nº45	Se	Pot Veh	é	EA	e	SoC	é	B	então	Pot ICE	é	EA
Regra Nº46	Se	Pot Veh	é	EA	e	SoC	é	M	então	Pot ICE	é	MA
Regra Nº47	Se	Pot Veh	é	EA	e	SoC	é	A	então	Pot ICE	é	MA
Regra Nº48	Se	Pot Veh	é	EA	e	SoC	é	MA	então	Pot ICE	é	A
Regra Nº49	Se	Pot Veh	é	EA	e	SoC	é	EA	então	Pot ICE	é	M

Legenda: Extremamente Baixo (EB), Muito Baixo(MB), Baixo (B), Médio (M), Alto (A), Muito Alto (MA), Extremamente Baixo (EB).

## ANEXO C: FIS DO ACIONAMENTO DO MOTOR NO MATLAB

```

[System]
Name='ICE'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=49
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='sum'
DefuzzMethod='centroid'

[Input1]
Name='Vehicle_Torque'
Range=[0 180]
NumMFs=7
MF1='EB':'trapmf',[0 0 10 28]
MF2='M':'trimf',[47 66 85]
MF3='MA':'trimf',[85 113 150]
MF4='B':'trimf',[28 47 66]
MF5='MB':'trimf',[10 28 47]
MF6='A':'trimf',[66 85 113]
MF7='EA':'trapmf',[113 150 180 180]

[Input2]
Name='SoC'
Range=[0 1]
NumMFs=7
MF1='EB':'trapmf',[0 0 0.45 0.48]
MF2='MB':'trimf',[0.45 0.48 0.53]
MF3='B':'trimf',[0.48 0.53 0.6]
MF4='M':'trimf',[0.53 0.6 0.67]
MF5='A':'trimf',[0.6 0.67 0.74]
MF6='MA':'trimf',[0.67 0.74 0.76]
MF7='EA':'trapmf',[0.76 0.8 1 1]

[Output1]
Name='ICE_ON/OFF'
Range=[0 1]
NumMFs=2
MF1='DESLIGADO':'trimf',[0.01 0.02
0.03]
MF2='LIGADO':'trimf',[0.98 0.99 1]
Rules]
1 1, 2 (1) : 1
1 2, 2 (1) : 1
1 3, 2 (1) : 1
1 4, 1 (1) : 1
1 5, 1 (1) : 1
1 6, 1 (1) : 1
1 7, 1 (1) : 1
5 1, 2 (1) : 1
5 2, 2 (1) : 1
5 3, 2 (1) : 1
5 4, 1 (1) : 1
5 5, 1 (1) : 1
5 6, 1 (1) : 1
5 7, 1 (1) : 1
4 1, 2 (1) : 1
4 2, 2 (1) : 1
4 3, 2 (1) : 1
4 4, 2 (1) : 1
4 5, 1 (1) : 1
4 6, 1 (1) : 1
4 7, 1 (1) : 1
2 1, 2 (1) : 1
2 2, 2 (1) : 1
2 3, 2 (1) : 1
2 4, 2 (1) : 1
2 5, 1 (1) : 1
2 6, 1 (1) : 1
2 7, 1 (1) : 1
6 1, 2 (1) : 1
6 2, 2 (1) : 1
6 3, 2 (1) : 1
6 4, 2 (1) : 1
6 5, 2 (1) : 1
6 6, 2 (1) : 1
6 7, 2 (1) : 1
3 1, 2 (1) : 1
3 2, 2 (1) : 1
3 3, 2 (1) : 1
3 4, 2 (1) : 1
3 5, 2 (1) : 1
3 6, 2 (1) : 1
3 7, 2 (1) : 1
7 1, 2 (1) : 1
7 2, 2 (1) : 1
7 3, 2 (1) : 1
7 4, 2 (1) : 1
7 5, 2 (1) : 1
7 6, 2 (1) : 1
7 7, 2 (1) : 1

```

## ANEXO D: FIS DA POTÊNCIA DO MOTOR NO MATLAB

[System]	Rules]
Name='POTENCIA'	1 1, 2 (1) : 1
Type='mamdani'	1 2, 2 (1) : 1
Version=2.0	1 3, 1 (1) : 1
NumInputs=2	1 4, 1 (1) : 1
NumOutputs=1	1 5, 1 (1) : 1
NumRules=49	1 6, 1 (1) : 1
AndMethod='min'	1 7, 1 (1) : 1
OrMethod='max'	5 1, 3 (1) : 1
ImpMethod='min'	5 2, 2 (1) : 1
AggMethod='sum'	5 3, 2 (1) : 1
DefuzzMethod='centroid'	5 4, 2 (1) : 1
	5 5, 1 (1) : 1
	5 6, 1 (1) : 1
	5 7, 1 (1) : 1
[Input1]	4 1, 4 (1) : 1
Name='Vehicle_Power'	4 2, 3 (1) : 1
Range=[0 43]	4 3, 3 (1) : 1
NumMFs=7	4 4, 2 (1) : 1
MF1='EB': 'trapmf', [0 7 7 9]	4 5, 1 (1) : 1
MF2='MB': 'trimf', [7 9 10]	4 6, 1 (1) : 1
MF3='B': 'trimf', [8.5 12 15]	4 7, 1 (1) : 1
MF4='M': 'trimf', [12 15 20]	2 1, 4 (1) : 1
MF5='A': 'trimf', [15 20 25]	2 2, 4 (1) : 1
MF6='MA': 'trimf', [20 25 30]	2 3, 4 (1) : 1
MF7='EA': 'trapmf', [25 30 43 43]	2 4, 3 (1) : 1
	2 5, 1 (1) : 1
[Input2]	2 6, 1 (1) : 1
Name='SoC'	2 7, 1 (1) : 1
Range=[0 1]	6 1, 5 (1) : 1
NumMFs=7	6 2, 5 (1) : 1
MF1='EB': 'trapmf', [0 0 0.45 0.48]	6 3, 5 (1) : 1
MF2='MB': 'trimf', [0.45 0.48 0.53]	6 4, 3 (1) : 1
MF3='B': 'trimf', [0.48 0.53 0.6]	6 5, 2 (1) : 1
MF4='M': 'trimf', [0.53 0.6 0.67]	6 6, 2 (1) : 1
MF5='A': 'trimf', [0.6 0.67 0.74]	6 7, 2 (1) : 1
MF6='MA': 'trimf', [0.67 0.74 0.76]	3 1, 6 (1) : 1
MF7='EA': 'trapmf', [0.76 0.8 1 1]	3 2, 5 (1) : 1
	3 3, 5 (1) : 1
[Output1]	3 4, 4 (1) : 1
Name='ICE_POWER'	3 5, 3 (1) : 1
Range=[0 1]	3 6, 3 (1) : 1
NumMFs=6	3 7, 2 (1) : 1
MF1='B': 'trapmf', [-8.5 7.8 7.8 8.5]	7 1, 6 (1) : 1
MF2='MB': 'trimf', [7.8 8.5 12.5]	7 2, 6 (1) : 1
MF3='M': 'trimf', [8.5 12.5 20]	7 3, 6 (1) : 1
MF4='A': 'trimf', [12.5 20 27.5]	7 4, 5 (1) : 1
MF5='MA': 'trimf', [20 27.5 35]	7 5, 5 (1) : 1
MF6='EA': 'trapmf', [27.5 35 43 43]	7 6, 4 (1) : 1
	7 7, 3 (1) : 1

## ANEXO E: ALGORITMO DO FLC PARA ACIONAMENTO DO ICE

```

/*****
Código fonte de um algoritmo de acionamento do
motor
à combustão interna de um veículo convencional
convertido
para uma arquitetura híbrida
*****/
#include <iostream>
#include <iomanip>
#include <fstream>
#include <string>
#include <sstream>

using namespace std;

const int rows=7, columns=4;

double SOC[7]= {0.45,0.48,0.53,0.6,0.67,0.74,0.8};
//Estado de carga da bateria (%)
double SOCsets[rows][columns]=
{{0,0,0.45,0.48},{0.45,0.48,0.48,0.53},{0.48,0.53,0.53,0.
6},{0.53,0.6,0.6,0.67},{0.6,0.67,0.67,0.74},{0.67,0.74,0.
74,0.76},{0.76,0.80,0.80,1.0}};

double TVEH[7]={10,28,47,66,85,113,150};// Torque do
veículo
double
TVEHsets[7][4]={{0,0,10,28},{10,28,28,47},{28,47,47,66
},{47,66,66,85},{66,85,85,113},{85,113,113,150},{113,1
50,150,180}};

double ICE[2]= {0.01,0.99}; //Status do ICE
double ICEsets[2][4]=
{{0,0.01,0.01,0.02},{0.98,0.99,0.99,1.00}};

/* Para o conjunto de regras para o array RulesOutput
o valor "0" representa a função de pertinência no array
ICEsets*/
double
RulesOutput[49]={1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0
,0,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1}
;

double x[5],y[7],z[5];

double pertIn[3][4]= {};
double pertOut[1][4]= {};

int Status,countdata=0;

double a,b,c,d,x1,x2,y1,y2,q,r,s;
double slope,crispValue;
double
pertinences[rows],PertInMin,PertInMax,pertinence;

double AreaMin, Centroid, Dividend,
Divisor,ICEOutput;
double SOCI,TVEHIn;

double FLCinputs[2]={};

int RuleNo=0,MFSelected=0;

void PertinenceIn() {
// Cálculo do grau de Pertinência das variáveis
for (int i = 0; i < 2; i++)
{
    crispValue=FLCinputs[i];

    a=pertIn[i][0];
    b=pertIn[i][1];
    c=pertIn[i][2];
    d=pertIn[i][3];

    if (crispValue < a)
    {
        if (a == b && b != c && c
!= d) {pertinence = 1.0;}
        else {pertinence = 0.0;}
    }
    else if (crispValue >= a &&
crispValue < b)
    {
        slope = 1.0 / (b - a);
        pertinence = slope *
(crispValue - b) + 1.0;
    }
    else if (crispValue >= b &&
crispValue < c)
    {
        pertinence = 1.0;
    }
    else if (crispValue >= c &&
crispValue <= d)
    {
        slope = 1.0 / (c - d);
        pertinence = slope *
(crispValue - c) + 1.0;
    }
    else if (crispValue > d)
    {
        if (c == d && c != b && b
!= a) {pertinence = 1.0;}
        else {pertinence = 0.0;}
    }
}

//Cria um array com todos os valores do grau de
pertinência
    pertinences[i]=pertinence;

```

```

//Cálculo do valor max da pertinência

    PertInMax=pertinences[0];

    for(int i=0; i<3; i++) {

        if(pertinences[i]>PertInMax&&pertinences[i]!=0
        )

            {

                PertInMax=pertinences[i];
            }

        PertInMin=PertInMax;

//Cálculo do valor min da pertinência

    for(int i=0; i<3; i++) {

        if(pertinences[i]<PertInMin&&pertinences[i]!=0)

            {

                PertInMin=pertinences[i];
            }

        }

    }

void PertinenceOut() {

//Função de Pertinência ativada pela regra
MFSelected=RulesOutput[RuleNo];
a=ICEsets[MFSelected][0];
b=ICEsets[MFSelected][1];
c=ICEsets[MFSelected][2];
d=ICEsets[MFSelected][3];

//Coordenadas y1 e y2 do trapezóide
if (PertInMin>b||PertInMin<a) {y1=0;}
else {y1=((PertInMin-a)/(b-a));}

if (PertInMin>d||PertInMin<c) {y2=0;}
else {y2=((PertInMin-c)/(d-c));}

//Coordenadas x1 e x2 do trapezóide
x1=(PertInMin*(b-a))+a;
x2=(PertInMin*(d-c))+c;

//Área do Trapezóide
AreaMin= ((d-a)+(x2-x1))*PertInMin/2;

double a1=x2-x1;
double b1=d-a;
double c1=x1-a;

//Coordenada do centróide do trapezóide

Centroid=
(2*a1*c1+a1*a1+c1*b1+a1*b1+b1*b1)/(3*(a1+b1))+a;
}

int main(){

    ifstream myfile ("ICEinput.txt");// Arquivo deve ser
    criado contendo o Torque e o Estado de Carga da
    Bateria

    ofstream myfileout ("ICEoutput.txt");//
    Arquivo deve ser criado em branco onde será
    armazenado o estado do ICE (Ligado/Desligado)
    string line;

    if (myfile.is_open()&&myfileout.is_open())
    {
        while (myfile.good() )
        {
            getline(myfile, line);
            istringstream ss(line);

            ss >>TVEHIn>>SOCIn;

            myfileout <<"Número da Amostra:
            "<<countdata<<endl<<'\n';
            myfileout <<"Torque:
            "<<TVEHIn<<'\t'<<"SOCIn: "<<'\t'<<SOCIn<<'\n';

            FLCinputs[0]=TVEHIn;
            FLCinputs[1]=SOCIn;

/*Determinação da função de pertinência que cada
variável
está contido dentro do respectivo conjunto fuzzy*/

            if (TVEHIn< TVEH[1])
                {x[0]=1;} else {x[0]=0;}
            if (TVEHIn>=TVEH[0]&&TVEHIn<TVEH[2])
                {x[1]=1;} else {x[1]=0;}
            if (TVEHIn>=TVEH[1]&&TVEHIn<TVEH[3])
                {x[2]=1;} else {x[2]=0;}
            if (TVEHIn>=TVEH[2]&&TVEHIn<TVEH[4])
                {x[3]=1;} else {x[3]=0;}
            if (TVEHIn>=TVEH[3]&&TVEHIn<TVEH[5])
                {x[4]=1;} else {x[4]=0;}
            if (TVEHIn>=TVEH[4]&&TVEHIn<TVEH[6])
                {x[5]=1;} else {x[5]=0;}
            if (TVEHIn> TVEH[6])
                {x[6]=1;} else {x[6]=0;}

```

```

if (SOCIn< SOC[1])
    {y[0]=1;}      else {y[0]=0;}
if (SOCIn>=SOC[0]&&SOCIn<SOC[2])
    {y[1]=1;}      else {y[1]=0;}
if (SOCIn>=SOC[1]&&SOCIn<SOC[3])
    {y[2]=1;}      else {y[2]=0;}
if (SOCIn>=SOC[2]&&SOCIn<SOC[4])
    {y[3]=1;}      else {y[3]=0;}
if (SOCIn>=SOC[3]&&SOCIn<SOC[5])
    {y[4]=1;}      else {y[4]=0;}
if (SOCIn>=SOC[4]&&SOCIn<SOC[6])
    {y[5]=1;}      else {y[5]=0;}
if (SOCIn> SOC[6])
    {y[6]=1;}      else
{y[6]=0;}

/*****
Base de Regras
*****/
/*Gera todas as combinações entre as funções de
pertinência do Torque e SoC(de VVL até VVH)*/

for(int q=0;q<7;q++)
{
    for(int r=0;r<7;r++)
    {
        if (x[q]==1 &&
y[r]==1) //Verifica para qual combinação a regra é
ativada
        {

            pertIn[0][0]= TVEHsets[q][0];

            pertIn[0][1]= TVEHsets[q][1];

            pertIn[0][2]= TVEHsets[q][2];

            pertIn[0][3]= TVEHsets[q][3];

            pertIn[1][0] = SOCsets[r][0];

            pertIn[1][1] = SOCsets[r][1];

            pertIn[1][2] = SOCsets[r][2];

            pertIn[1][3] = SOCsets[r][3];

            // Calcula
o Grau de Pertiência para as variantes de Entrada

            PertinenceIn();
// Calcula Calcula o Grau de Pertiência para a Saída

```

```

PertinenceOut();

            Dividend=Dividend+Centroid*AreaMin;

            Divisor=Divisor+AreaMin;
        }
        else
        {

            MFSelected=RulesOutput[RuleNo]; //Função
de Pertinência ativada pela regra

            Dividend=Dividend;

            Divisor=Divisor;
        }

        RuleNo=RuleNo+1; //Contador progressivo
para o número da regra
    }
}

ICEOutput=Dividend/Divisor;

if (ICEOutput<0.50)
{
    Status=0;
}
else if(ICEOutput>=0.50)
{
    Status=1;
}

myfileout <<"Status do Motor: "<<
Status <<"\t"<< "Grau de Pertinência:
"<<ICEOutput<<endl<<"\n";
    countdata=countdata+1; //Contador
progressivo para número o número da amostra
    RuleNo=0;
    Divisor=0;
    Dividend=0;

}
myfile.close();
myfileout.close();

} else {cout << "Não é possível abrir
o arquivo";}

return 0;
}

```