

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

LUCAS MIRANDA GUIMARÃES

**SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE FREIOS REGENERATIVOS
UTILIZANDO CONTROLADOR LÓGICO FUZZY EM VEÍCULOS
ELÉTRICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PONTA GROSSA
2021**

LUCAS MIRANDA GUIMARÃES

**SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE FREIOS REGENERATIVOS
UTILIZANDO CONTROLADOR LÓGICO FUZZY EM VEÍCULOS
ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado(a) como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Dra. Fernanda Cristina Corrêa

PONTA GROSSA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LUCAS MIRANDA GUIMARÃES

**SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE FREIOS REGENERATIVOS UTILIZANDO
CONTROLADOR LÓGICO FUZZY EM VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 10 de dezembro de 2021

Fernanda Cristina Corrêa
Doutorada
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Cristhiane Gonçalves
Doutorada
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Edson Luiz Salgado Silva
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2021

Dedico este trabalho a meu avô Adilson
(in memoriam) aquele que me deixou o
desejo de ser engenheiro.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível se fosse pelo apoio de muitas pessoas, não posso enumerar quantas pessoas me ajudaram nesta caminhada, desde familiares à amigos, colegas de turma, mestres professores, todos merecem meus agradecimentos, tantos nomes que se fosse nomear um a um, faltaria espaço neste documento.

Quero agradecer primeiramente a minha mãe Isabel, que nas horas mais difíceis esteve ali, as vezes deixando de fazer algo para ela mesma, afim de manter seu filho em uma graduação, dando tudo que fosse necessário para que este momento pudesse acontecer.

A minha orientadora, Profa. Dra. Fernanda Corrêa, pela paciência em ensinar este aluno bem inadimplente, pelo amor apresentado ao assunto abordado, pela disponibilidade sempre que eu precisava de uma ajuda.

Quero agradecer a Mariana, minha namorada, que me apoiou nos momentos de lágrimas, que sempre tinha uma palavra de motivação, sempre mostrando uma luz no fim do túnel.

A toda universidade, pelo apoio educacional, por oferecer toda estrutura necessária para esta realização, em especial ao Departamento de Eletrônica, fornecendo sempre o melhor e mais bem preparado pessoal, desde a atendente ao coordenador de departamento, sempre em prontidão para atender seus alunos.

E acima de tudo e de todos, agradecer a Deus, pelo dom da vida, por me dar forças todos os dias para seguir em frente mesmo com todas as dificuldades encontradas, sempre guiando pelo caminho da verdade e da justiça.

Aqui deixo meus sinceros agradecimentos a todos os citados e a todos aqueles que não foram citados, mas que sabem, que sem vocês, nada disso seria possível.

"Todos nascem como originais, mas
muitos morrem como fotocópias."

(ACUTIS, Carlo)

RESUMO

GUIMARÃES, Lucas Miranda. **SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE FREIOS REGENERATIVOS UTILIZANDO CONTROLADOR LÓGICO FUZZY EM VEÍCULOS ELÉTRICOS**. 2021. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

Com o aumento do número de veículos elétricos no mercado e com a busca incessante por formas de otimizar a eficiência energética destes veículos, o estudo de modelos de freios regenerativos se torna cada vez mais necessário. A finalidade deste trabalho é de analisar um modelo de frenagem regenerativa utilizando teorias de controle *Fuzzy* em veículos elétricos de forma a prever sua autonomia e sua atuação em relação a um sistema de frenagem comum, verificando as características apresentadas pelas baterias presentes nestes veículos. É proposta uma simulação através do simulador veicular **ADVISOR**, presente no *software* **MATLAB/SIMULINK®** para o sistema de frenagem regenerativa.

Palavras-chave: Frenagem Regenerativa. Veículo Elétrico. Controle. Fuzzy. ADVISOR.

ABSTRACT

GUIMARÃES, Lucas Miranda. **SIMULATION OF A REGENERATIVE BRAKE SYSTEM USING FUZZY LOGIC CONTROLLER IN ELECTRIC VEHICLES**. 2021. 54 p. Final Coursework (Bachelor's Degree in Electrical Engineering) – Federal University of Technology – Paraná. Ponta Grossa, 2021.

With the increase number of electric vehicles on the market and the incessant search for ways to optimize the energy efficiency of these vehicles, the study of regenerative brake models becomes increasingly necessary. The purpose of this work is to analyze a regenerative braking model using *Fuzzy* control theories in electric vehicles in order to predict its autonomy and its performance in relation to a common braking system, verifying the characteristics presented by the batteries present in these vehicles. A simulation is proposed using the vehicle simulator **ADVISOR**, present in the *software MATLAB/SIMULINK®* for the regenerative braking system.

Keywords: Regenerative Braking. Electric Vehicle. Control. Fuzzy. **ADVISOR**.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Veículo de Da Vinci	16
Figura 2 – Veículo a vapor de Cugnot	17
Figura 3 – O primeiro veículo do mundo foi o Patent-Motorwagen, criado em 1886.	17
Figura 4 – Sistema de Alimentação veicular (Veículo a Combustão Interna) . .	19
Figura 5 – Sistema de Transmissão veicular - Tração Dianteira	20
Figura 6 – Sistema de Transmissão veicular - Tração Traseira	20
Figura 7 – Sistema de Transmissão veicular - Tração 4x4	20
Figura 8 – Sistema de Direção veicular	21
Figura 9 – Sistema de Suspensão veicular	22
Figura 10 – Sistema de Frenagem veicular	22
Figura 11 – Subsistemas veiculares	24
Figura 12 – Tela Inicial do ADVISOR	27
Figura 13 – Tela de Modelagem do Veículo	27
Figura 14 – Função obtida de modelos Takagi-Sugeno	30
Figura 15 – Mapa de eficiência motor de ímã permanente de 49kW	33
Figura 16 – Ciclo de condução x ciclo de condução executado pelo VE com câmbio de cinco velocidades	34
Figura 17 – Configuração do ciclo de condução	35
Figura 18 – Modelo de blocos do VE	36
Figura 19 – Distribuição de forças conforme a velocidade	36
Figura 20 – Estrutura da estratégia de frenagem e controle	37
Figura 21 – Modelo do Controlador de Lógica Fuzzy	38
Figura 22 – Função de pertinência do SOC	39
Figura 23 – Função de pertinência da velocidade	39
Figura 24 – Função de pertinência da força de frenagem requerida	40
Figura 25 – Superfície gráfica das regras do FLC	41
Figura 26 – Sistema – Módulo de controle do VE "<vc> ev"	42
Figura 27 – Sistema – Estratégia de frenagem mecânica	43
Figura 28 – Sistema – Estratégia de frenagem regenerativa	43
Figura 29 – Simulação do VE - Modelo convencional	45
Figura 30 – Simulação do VE - Modelo modificado	46
Figura 31 – SOC da Bateria no modelo convencional x modificado	47
Figura 32 – Ciclo de condução executado no modelo convencional x modificado	47
Figura 33 – Diferença em segundos (eixo x) do ciclo de condução executado no modelo convencional x modificado	48
Figura 34 – Mapa de eficiência de carga da bateria	50
Figura 35 – Mapa de eficiência de descarga da bateria	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do veículo atribuídos no ADVISOR	31
Tabela 2 – Relação de tensão e massa de baterias por módulo apresentados no ADVISOR	32
Tabela 3 – Tabela de regras definidas para o FLC	41
Tabela 4 – Relação de dados dos sistemas do VE	49
Tabela 5 – Cálculo de eficiência geral do sistema	49

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

SIGLAS

ADVISOR	<i>Advanced Vehicle Simulator</i>
BFR	Força de Frenagem Requerida
VE	Veículo Elétrico
H	Função de Pertinência Alta
L	Função de Pertinência Baixa
M	Função de Pertinência Média
SOC	Estado de Carga
T_B	Temperatura da Bateria
K_T	Coeficiente de compensação da relação entre a temperatura da bateria e a máxima corrente de carga permitida
K_{T1}	Coeficientes de temperatura 1
K_{T2}	Coeficientes de temperatura 2
CLF	Controlador Lógico Fuzzy
SPD	Velocidade
SUV	Veículo Utilitário Esportivo

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

D_A	Força de Arrasto	[N]
D_x	Desaceleração	[m/s ²]
E_d	Energia Cinética Dissipada	[J]
F_f	Força de Frenagem No Eixo Dianteiro	[N]
F_m	Força de Frenagem Regenerativa	[N]
F_r	Força de Frenagem No Eixo Traseiro	[N]
n	Número Indefinido	
g	Aceleração da Gravidade	[m/s ²]
P_d	Potência Dissipada	[W]
t	Tempo	[s]
V_0	Velocidade Inicial	[m/s]
V_f	Velocidade Final	[m/s]
W	Peso	[N]

LETRAS GREGAS

α	Variável	
β	Variável	
γ	Variável	
δ	Variável	
θ	Ângulo de Inclinação	[rad]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	MOTIVAÇÃO	13
1.2	OBJETIVO	14
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivo específico	14
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2	REVISÃO LITERÁRIA	16
2.1	VEÍCULO MODERNO	17
2.1.1	Sistema de Alimentação	18
2.1.2	Sistema de Transmissão	19
2.1.3	Sistema de direção	21
2.1.4	Sistema de suspensão	21
2.1.5	Sistema de frenagem	22
2.2	VEÍCULO ELÉTRICO	23
2.2.1	Frenagem regenerativa	25
2.3	<i>ADVANCED VEHICLE SIMULATOR</i>	26
2.4	TEORIA FUZZY	28
2.4.1	Método de inferência Takagi-Sugeno	29
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	31
3.1	BATERIA	31
3.2	MOTOR	32
3.3	TRANSMISSÃO	33
3.4	CICLO DE CONDUÇÃO	34
3.5	ESTRUTURA DO SISTEMA DE FRENAGEM REGENERATIVA E DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE	35
3.6	MODIFICAÇÃO DO MÓDULO DE CONTROLE DO VEÍCULO NO SIMULINK	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	SOC DA BATERIA E CICLO DE CONDUÇÃO	45
4.2	EFICIÊNCIA DO VEÍCULO	48
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	51
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem sido observado o crescimento dos veículos movidos por motores elétricos, substituindo os motores de combustão interna predominantes no mercado. Países como Reino Unido, França, Noruega e Holanda começaram a estabelecer prazos para banir veículos movidos a óleo diesel (FERNANDES, 2017), dessa forma cada vez mais é vislumbrado um mercado que se transforma devido à utilização destes veículos elétricos e híbridos.

No Brasil, o mercado começou a se preparar para estes veículos, quando em 2012 a Ford vendeu o primeiro veículo híbrido no país (ORÉFICE, 2019), estes que utilizam de dois motores, um elétrico e um de combustão em conjunto. Hoje pode-se encontrar diversos modelos híbridos e veículos totalmente elétricos.

É bastante frequente o debate sobre formas de aumentar a autonomia destes veículos, pois há uma grande discussão em torno dos custos ambientais e econômicos que a produção de baterias para suprir estes veículos com uma autonomia relevante (BORILI, 2020). Logo tem-se como exemplo soluções utilizadas no BMW i3 que utiliza um pequeno motor de combustão interna a gasolina ligado ao carregamento da bateria, aumentando sua autonomia (ORÉFICE, 2019). Visto a necessidade de reaproveitar toda forma de energia proveniente de várias fontes, que se deu o desenvolvimento dos sistemas de frenagem regenerativa.

A frenagem regenerativa tem como foco utilizar toda ou grande parte da energia cinética gerada em uma frenagem, convertida em energia elétrica, utilizada para o recarregamento da bateria ou supercapacitores utilizados no sistema veicular.

1.1 MOTIVAÇÃO

O que motiva a realização desse estudo é o aumento das pesquisas sobre veículos movidos por motores elétricos, o aumento destes, no mercado automobilístico, o que leva a busca de melhorar a eficiência energética nos veículos e das formas para se aumentar a sua autonomia.

Uma destas formas de melhor aproveitamento energético é a frenagem regenerativa. Sistema este que utiliza da energia gerada através da desaceleração de um

veículo ao ocorrer o acionamento dos freios, que, durante a desaceleração, libera o motor elétrico, atuando como um gerador elétrico, retornando parcialmente a energia para as baterias ou supercapacitores, estes extremamente necessários no movimento de arrancada dos veículos devido a sua característica de fornecer um alto pico de energia em um curto intervalo de tempo.

Este retorno de energia à bateria ou aos supercapacitores pode ocorrer conforme a intensidade de frenagem associada ao veículo no instante de tempo associado, segundo a topologia do sistema veicular ou do sistema de controle empregado ao sistema de frenagem regenerativa do veículo apresentado.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho visa a comparação de um sistema de freio regenerativo controlado por meio do controlador *Fuzzy* com um sistema de frenagem convencional.

1.2.2 Objetivo específico

Os objetivos específicos deste trabalho tem como principal foco:

- Estudo de funcionamento da frenagem regenerativa desenvolvida por um Veículo Elétrico (VE).
- Estudo e utilização da ferramenta de simulação de veículos *Advanced Vehicle Simulator* (ADVISOR), além de modificações necessárias para simulação do modelo proposto.
- Estudo e utilização de um controlador Fuzzy utilizando método de inferência Sugeno e sua aplicação no ADVISOR, através do Matlab/Simulink®.
- Comparar resultados obtidos entre o modelo utilizando frenagem regenerativa convencional e uma frenagem regenerativa utilizando um Controle Lógico Fuzzy (CLF).

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

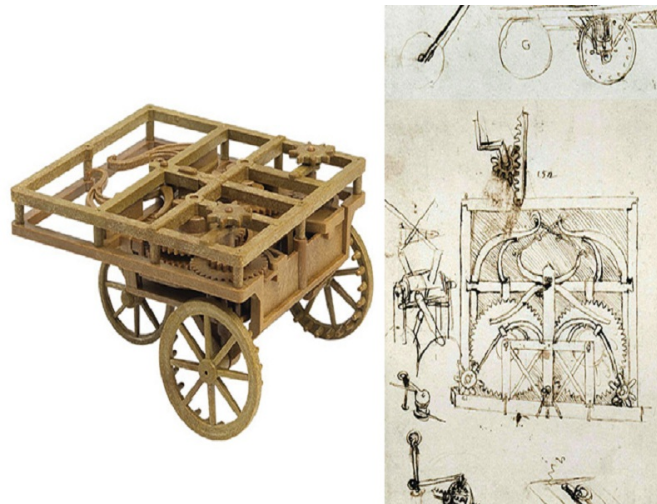
Este trabalho esta organizado da seguinte maneira:

- O Capítulo 2 contempla de maneira breve, a história dos veículos, os primeiros veículos autônomos, os principais sistemas que compõe um veículo, o veículo elétrico e seus subsistemas, o funcionamento de um freio regenerativo, o *software* de simulação ADVISOR e o sistema de controle Fuzzy pelo método Sugeno.
- O Capítulo 3 aborda os dados utilizados para cada característica relevante a simulação da frenagem regenerativa do veículo, como baterias, motor e transmissão, aborta também o ciclo de condução desenvolvido pelo veículo durante a simulação, a estrutura utilizada pelo MATLAB/SIMULINK® para o modelo do veículo e a estratégia de controle aplicado, além do dimensionamento do CLF, regras e modificações feitas no modelo do VE apresentado pelo ADVISOR.
- O Capítulo 4 apresenta os dados e resultados provenientes das simulações realizadas no Capítulo 3, além de apresentar as análises dos resultados obtidos para o estado de carga (SOC) da bateria e da eficiência do veículo simulado.
- O Capítulo 5 aborda todas as conclusões obtidas através das análises dos resultados do Capítulo 4 e apresenta possibilidade de melhorias e abordagens possíveis para trabalhos futuros no mesmo segmento de estudo deste trabalho.

2 REVISÃO LITERÁRIA

O termo veículo pode ser definido segundo dicionário *Michaelis*: "*Que contém em si mesmo os meios de propulsão; automotor, autopropulsor*"(MICHAELIS,), assim referindo a veículos, temos como o primeiro veículo conhecido da história, o carro de Leonardo Da Vinci (1452 – 1519), a Figura 1, um veículo desenhado em seus manuscritos e experimentado em 2004 por cientistas italianos que utilizaram destes manuscritos e conseguiram colocá-lo em funcionamento, quase 500 anos após a morte do grande inventor (KENNEDY, 2004).

Figura 1 – Veículo de Da Vinci



Fonte: Teclube (2017)

O primeiro veículo propriamente construído foi um veículo que utilizava motor a vapor, elaborado pelo francês Nicolas-Joseph Cugnot(1725 – 1804) no ano de 1769 (Figura 2), utilizado de forma bélica pelo exército da França, cujo um dos dois veículos construídos se encontra hoje na posse do *Conservatoire national des arts et métiers* de Paris (GREGERSEN, 2020). Em 1885, um alemão chamado Karl Friedrich Benz, foi responsável pelo primeiro veículo com motor a combustão interna utilizando gasolina, o Patent-Motorwagen (CUNNINGHAM, 2020), observado na Figura 3, assim dando início ao que se conhece hoje como veículos modernos.

Figura 2 – Veículo a vapor de Cugnot



FONTE: Erik Gregersen (2019)

Figura 3 – O primeiro veículo do mundo foi o Patent-Motorwagen, criado em 1886.



FONTE: Wikicommons (2018)

2.1 VEÍCULO MODERNO

Os veículos modernos podem ser divididos em diversos sistemas, dos quais agregam um grande valor de engenharia aplicado, utilizando-se tecnologia de ponta aos produtos que a cada dia são aprimorados buscando segurança e conforto para o condutor e possíveis passageiros.

Os principais sistemas que podem ser destacados no funcionamento de um veículo básico hoje é:

- Sistema de alimentação
- Sistema de transmissão
- Sistema de direção
- Sistema de suspensão
- Sistema de frenagem

Há também subsistemas atuando em conjunto com estes sistemas, como sistema de arrefecimento que atua diretamente mantendo a integridade do sistema de alimentação ou o sistema elétrico que atua em todo o veículo, atuando como controle, comunicação, partida, automatização, sensores, iluminação, etc.

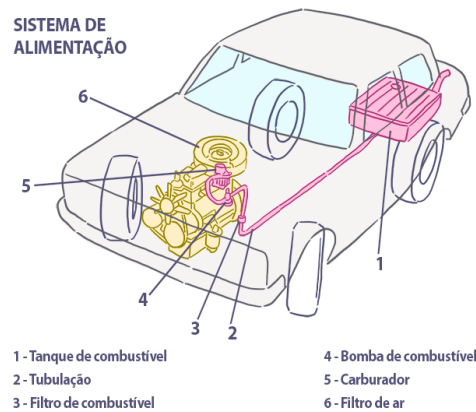
2.1.1 Sistema de Alimentação

O sistema de alimentação do veículo, é formado por um conjunto de peças e subsistemas que trabalham principalmente em conjunto com o motor do veículo. Hoje, no mercado, o motor de combustão interna é a fonte de energia mais utilizada pelos veículos automotores convencionais, os motores geram energia através de energia química contida no combustível em calor e o calor assim produzido, em um trabalho mecânico. A conversão de energia química ocorre através da combustão de uma mistura entre combustíveis fósseis, etanol ou gás natural, com uma mistura de oxigênio, enquanto a conversão subsequente em trabalho mecânico é realizada através do aumento de pressão no bloco do motor, movimentando as peças móveis do motor a combustão interna (BOSCH, 2005).

A injeção de combustível e a sua combustão ocorrem principalmente pelo trabalho em conjunto dos subsistemas de ignição e injeção. Dentre esses subsistemas pode-se destacar primeiramente o subsistema de ignição que conta com a presença de velas, cabos de velas, regulador de tensão, entre outras partes, responsáveis pela geração de uma centelha no bloco do motor, que inicia o processo de queima do combustível. O processo de injeção de combustível no bloco do motor, é realizado pelo subsistema de injeção, formado pela bomba de combustível, bicos injetores, corpo da borboleta ou carburador, filtros, entre outras partes que transportam o combustível do tanque para o motor, onde é realizada uma mistura ideal de combustível com o oxigênio, sendo posteriormente injetado no motor através do corpo da borboleta nos veículos mais novos com injeção eletrônica ou pelo carburador nos veículos mais antigos (BOSCH, 2005).

De forma simples, o sistema de alimentação de um veículo carburado pode ser visualizado através da Figura 4.

Figura 4 – Sistema de Alimentação veicular (Veículo a Combustão Interna)



FONTE: Site Aprovadetrans (2019)

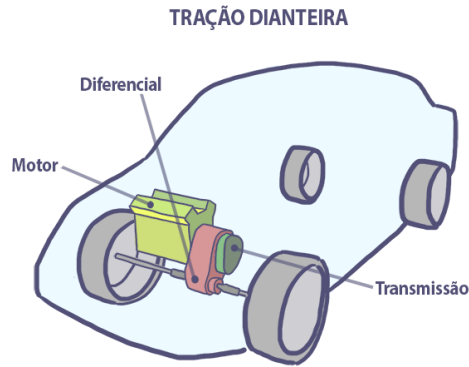
2.1.2 Sistema de Transmissão

O sistema de transmissão tem como principal função, fornecer as forças de tração e impulso necessárias para a realização do movimento do veículo. Após a conversão de energia realizada nos motores, obtém-se uma energia mecânica resultante, que possui uma determinada faixa de rotação, limitada pela rotação de marcha lenta e pela rotação máxima do motor. Com base nesses limites, se obtém através das relações de marchas dos veículos os valores característicos máximos de torque e potência, oferecidos uniformemente. As relações de transmissão fornecem para as rodas do veículo, o torque disponível à força de tração requerida no momento. O acionamento deste torque disponível pode ser obtido através de uma seleção manual de marchas, onde o condutor do veículo decide qual marcha utilizar de acordo com sua necessidade, ou pela seleção automática, onde um sistema de engrenagens ou polias e correias, se adapta a necessidade do veículo, selecionando automaticamente a marcha necessária no momento (BOSCH, 2005).

A distribuição do torque e da potência disponível para as rodas do veículo, através da transmissão, podem ocorrer de três formas distintas. Ela pode ocorrer através de uma transmissão para o eixo dianteiro, onde o torque disponibilizado pela caixa de transmissão é enviado às rodas dianteiras do veículo, sendo estas as responsáveis pela tração do veículo (Figura 5). Pode ocorrer uma transmissão para o eixo traseiro, onde o torque disponibilizado pela caixa de transmissão é enviado às rodas traseiras do veículo, sendo estas as responsáveis pela tração do veículo (Figura 6). E por fim, a

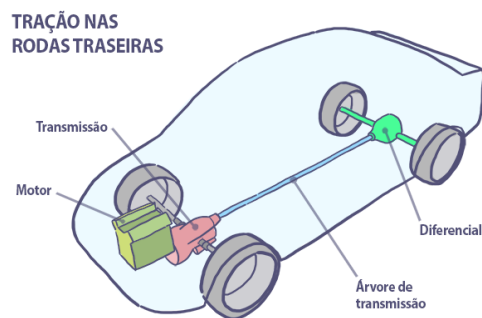
transmissão pode ocorrer conjuntamente para os eixos traseiro e dianteiro simultaneamente, assim o torque é transmitido para todas as quatro rodas do veículo, definindo uma tração nas quatro rodas, popularmente conhecida como tração 4x4 (Figura 7).

Figura 5 – Sistema de Transmissão veicular - Tração Dianteira



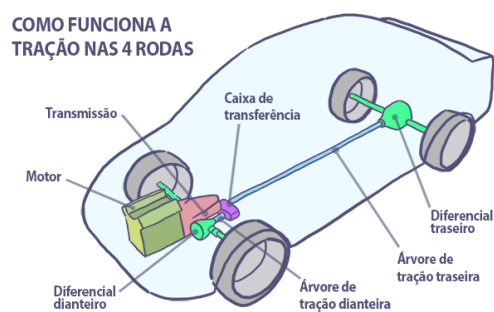
FONTE: Site Aprovadetrans (2019)

Figura 6 – Sistema de Transmissão veicular - Tração Traseira



FONTE: Site Aprovadetrans (2019)

Figura 7 – Sistema de Transmissão veicular - Tração 4x4

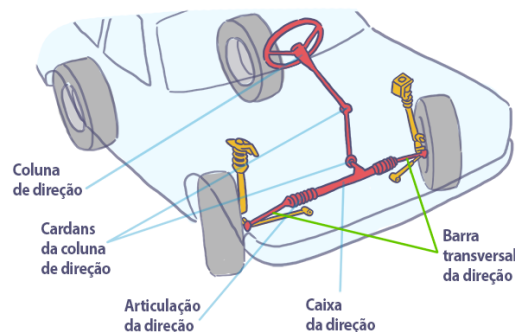


FONTE: Site Aprovadetrans (2019)

2.1.3 Sistema de direção

Sistema de direção, exemplificado na Figura 8 é o sistema responsável pela conversão do movimento giratório realizado no volante pelo condutor do veículo, em um movimento angular para as rodas, que direcionam o veículo (BOSCH, 2005). Os sistemas de direção podem ser classificados como direção mecânica, direção hidráulica e direção elétrica. A direção mecânica exige que toda a força necessária para a angulação das rodas seja realizado pelo motorista por meio do volante. A direção hidráulica utiliza uma bomba com fluido comprimido para auxiliar o movimento, diminuindo a força necessária para realizar a angulação das rodas. Já a direção elétrica utiliza um pequeno motor elétrico para auxiliar esta angulação que geralmente possui força variante conforme a velocidade do veículo, onde o esforço do motor é maior em baixas velocidades e diminuindo de acordo com que aumenta a velocidade, tornando a direção mais firme e segura.

Figura 8 – Sistema de Direção veicular



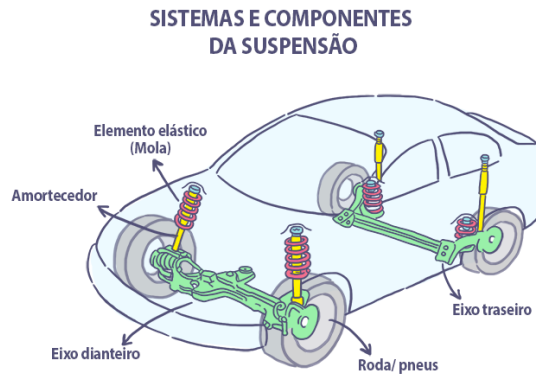
FONTE: Site Aprovadetrans (2019)

2.1.4 Sistema de suspensão

O sistema de suspensão (Figura 9) trata-se do sistema responsável pela conexão da carroceria do veículo as rodas, que, essencialmente, possibilita o movimento vertical das rodas, para a compensação das irregularidades do trajeto descrito pelo veículo. Na suspensão, geralmente, as rodas dianteiras são direcionais, embora haja alguns veículos com rodas traseiras direcionais. Assim a suspensão traseira e dianteira se diferem devido aos elementos de direção e à posição da sustentação longitudinal e transversal do veículo. Através de uma geometria adequada e da regulagem da

suspensão, molas e amortecedores, é possível reduzir além dos movimentos verticais do veículo, também a arfagem e a resistência a rolagem (BOSCH, 2005).

Figura 9 – Sistema de Suspensão veicular

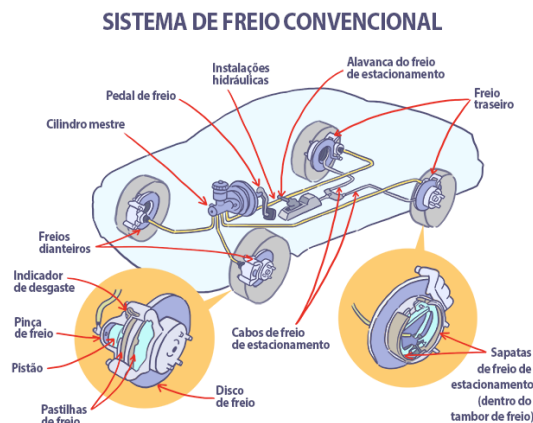


FONTE: Site Aprovadetrans (2019)

2.1.5 Sistema de frenagem

O sistema de freios ou frenagem observado na Figura 10 é o conjunto de equipamentos, cuja finalidade é reduzir ou manter a velocidade do veículo, podendo leva-lo à imobilidade ou mantê-lo imóvel. O freio, é um elemento que gera forças de opostas ao movimento ou à tendência de movimento do veículo. O sistema de freio permite ao motorista, progressivamente, controlar a velocidade do veículo, de acordo com sua necessidade (BOSCH, 2005).

Figura 10 – Sistema de Frenagem veicular



FONTE: Site Aprovadetrans (2019)

Dentre os sistemas de freio, pode-se citar alguns dos modelos mais presentes,

como:

- Sistema de Freio Auxiliar
- Sistema de Freio de Estacionamento
- Sistema de Freio de Atuação Contínua

O principal sistema de freios a ser considerado neste trabalho, é o sistema de freios regenerativos, abordado na subseção 2.2.1

2.2 VEÍCULO ELÉTRICO

Neste trabalho considera-se um veículo elétrico, um automóvel que possua propulsão provinda de pelo menos um motor elétrico. Veículos elétricos possuem sua fabricação datada desde o fim do Século XIX, um deles, o veículo brasileiro, chamado Itaipu E150, desenvolvido pela extinta empresa brasileira Gurgel na década de 1970.

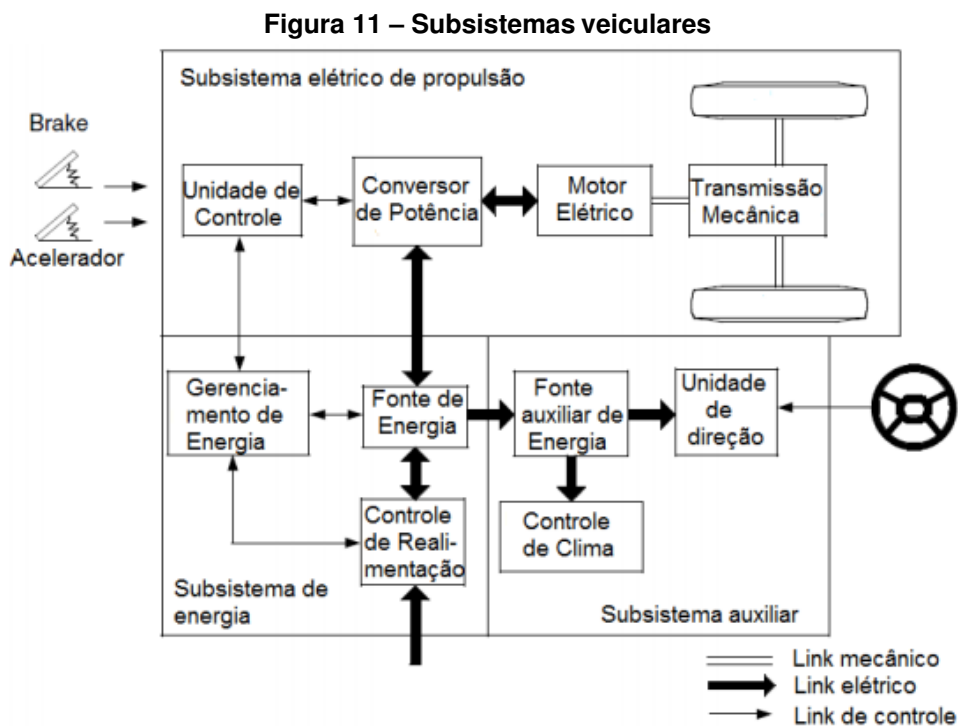
Os veículos elétricos atualmente possuem fabricação em carroceria e chassis próprios, alguns modelos híbridos chegaram a ser adotados para veículos convencionais (modelos comercialmente a combustão), mas hoje, grande parte do mercado adota a política de utilização de carroceria e chassi próprio, visando dimensões e pesos que favoreçam a autonomia dos veículos elétricos, fator muito importante, fonte de estudos, para melhoria dessa categoria de veículo.

Segundo Ehsani (2005), os veículos elétricos podem ser divididos em 3 subsistemas:

- Subsistema elétrico de propulsão, que corresponde à:
 - Unidade de Controle
 - Conversor de Potência
 - Motor Elétrico
 - Transmissão Mecânica
- Subsistema de energia, que corresponde à:
 - Gerenciamento de Energia
 - Fonte de Energia

- Controle de Realimentação
- Subsistema auxiliar, que corresponde à:
 - Fonte Auxiliar de Energia
 - Controle de Clima
 - Unidade de Direção

Estes subsistemas e seus componentes são interligados segundo a Figura 11, possuindo *links* de controle, ligação elétrica ou ligação mecânica.



Fonte: Ehsani (2005)

A unidade de controle, através do sinal do pedal de frenagem ou aceleração se comunica com o conversor de potência, para controlar o fluxo de energia entre as fontes de energia (baterias ou supercapacitores) e motor. A unidade de gerenciamento de energia trabalha em conjunto com a unidade de controle. Assim obtém a força de frenagem regenerativa e a quantidade de energia recuperada para as fontes de energia (MONTEIRO, B. C. R.; MOTTA, L. P., 2015).

2.2.1 Frenagem regenerativa

Em veículos convencionais, ao realizar uma frenagem, toda a energia cinética do veículo é convertida em energia térmica nas pastilhas de freio através do atrito e dissipada para o meio ambiente, sendo perdida toda energia (BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; DIAS, H., 2012).

Pela 2ª Lei de Newton para movimento longitudinal, temos que a frenagem, pode ser definida por:

$$\frac{-W}{g} D_x = -F_f - F_r - D_A - W \sin\theta \quad (1)$$

Onde:

- W - Peso do Veículo em $[N]$
- g - Aceleração da Gravidade em $[m/s^2]$
- D_x - Desaceleração do Veículo em $[m/s^2]$
- F_f - Força de Frenagem no Eixo Dianteiro em $[N]$
- F_r - Força de Frenagem no Eixo Traseiro em $[N]$
- D_A - Força de Arrasto do Veículo em $[N]$
- θ - Ângulo de Inclinação da Pista em $[rad]$

Assim, obtendo uma energia dissipada, que pode ser definida por:

$$E_d = \frac{W}{2g} \cdot (V_0^2 - V_f^2) \quad (2)$$

Onde:

- E_d - Energia Cinética Dissipada Pelo Sistema de Freios do Veículo $[J]$
- V_0 - Velocidade Inicial do Veículo em $[m/s]$
- V_f - Velocidade Final do Veículo em $[m/s]$

Com o tempo de frenagem definido por:

$$t = \frac{V_0 - V_f}{D_x} \quad (3)$$

Onde:

- t - Tempo de Desaceleração [s]

Dividindo a Equação 2 pela Equação 3, obtém-se o valor em Watts da energia dissipada durante o processo de frenagem, obtendo a seguinte equação:

$$P_d = \frac{WD_x(V_0^2 - V_f^2)}{2g(V_0 - V_f)} \quad (4)$$

Onde:

- P_d - Potência Dissipada Pelo Sistema de Freios do Veículo [W]

Nos veículos híbridos e elétricos, existe uma solução para esta perda de energia, a qual trabalhamos neste documento, a frenagem regenerativa. Que de forma rápida podemos definir como uma forma de reaproveitar esta energia dissipada para um carregamento rápido das células de energia do veículo, como baterias e supercapacitores.

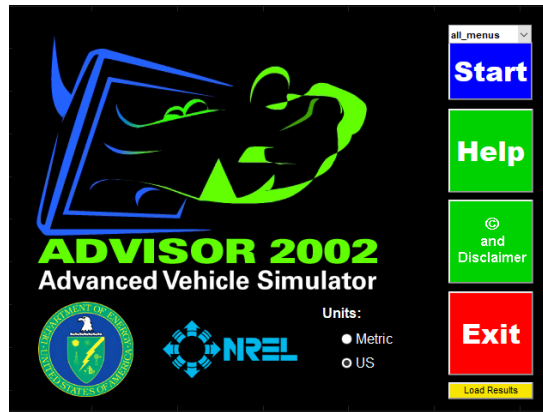
Geralmente nos veículos híbridos e elétricos, o sistema de freio regenerativo coexiste com o sistema de freio convencional, logo o projeto e o sistema de controle dos sistemas de frenagem são as principais preocupações desse sistema (EHSANI, M. et al., 2004).

Em veículos híbridos ou elétricos que possuem baterias e supercapacitores para o armazenamento de energia provinda dos freios regenerativos, utilizam um sistema de conversores bidirecionais, comumente abaixador-elevador de tensão (Buck-Boost) podendo conter entradas para controle de fluxo na tração e frenagem, entre as máquinas elétricas e os sistemas de armazenamento de energia (PAREDES, 2013).

2.3 ADVANCED VEHICLE SIMULATOR

Também conhecido como ADVISOR (Figura 12), o *Advanced Vehicle Simulator* é uma ferramenta desenvolvida dentro do ambiente do *software* matemático MATLAB/SIMULINK® para simulação de todas as características veiculares presentes, possuindo a extensa gama de possibilidades de veículos conhecidos, dentre veículos convencionais, híbridos, elétricos puros, entre outros.

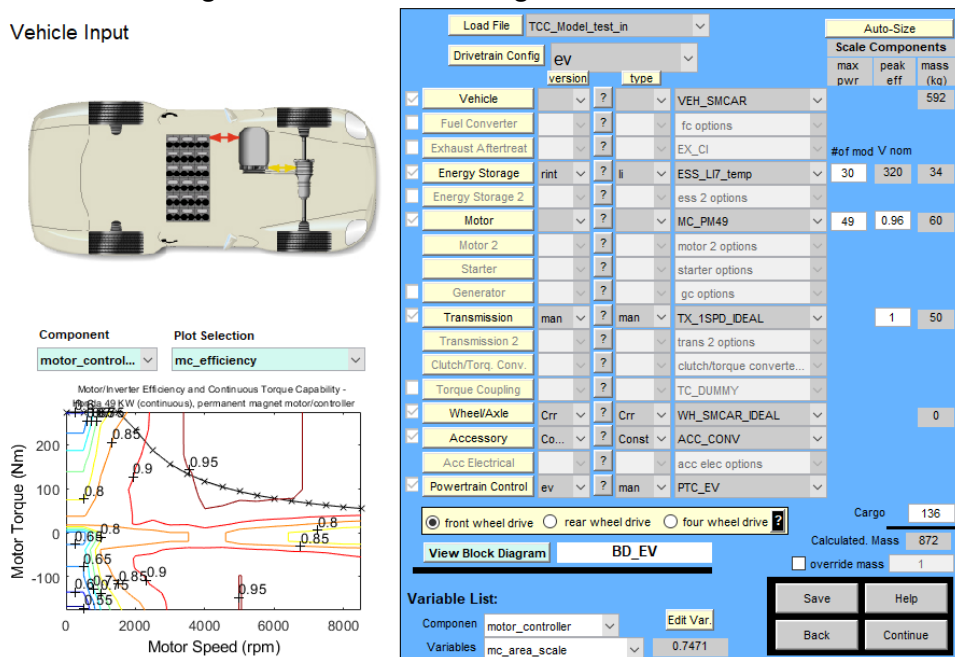
Figura 12 – Tela Inicial do ADVISOR



FONTE: Autoria própria (2021)

Desenvolvido por um grupo formado por Aaron Brooker, Kristina Haraldsson, Terry Hendricks, Valerie Johnson, Kenneth Kelly, Bill Kramer, Tony Markel, Michael O’Keefe, Sam Sprik, Keith Wipke, Matthew Zolot, com contribuição de Desikan Bharathan, Steve Burch, Matthew Cuddy e Dave Rausen, em uma associação do DOE (*U. S. Department Of Energy*) - Departamento de energia dos Estados Unidos da América e o NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) - Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos Estados Unidos da América, o ADVISOR é uma ferramenta robusta e muito utilizada por grande parte do mercado automobilístico e acadêmico, vista na Figura 13.

Figura 13 – Tela de Modelagem do Veículo



FONTE: Autoria própria (2021)

O ADVISOR nos permite editar as configurações presentes no veículo de estudo, desde modelo de propulsão, tração, potência e categoria de motor, categorias de câmbios, contagem de células combustíveis, categoria de bateria para VE (veículo elétrico), além da possibilidade de se modificar e aprimorar situações de simulação, como circuito percorrido pelo veículo, por exemplo. Outro ponto abordado neste trabalho em relação ao ADVISOR, é sua interface de blocos do *SIMULINK®* que nos permite realizar modificações na modelagem intrínseca do veículo, no nosso caso, modificando a abordagem do controle de frenagem do veículo, de uma frenagem comum, para um modelo de frenagem regenerativa controlada através da lógica fuzzy (MARKEL et al., 2002).

2.4 TEORIA FUZZY

Em 1920, o polonês Jan Lukasiewicz desenvolveu a primeira teoria lógica que utilizava conceitos "vagos" ou "difusos", com conjuntos de pertinência de 0, $\frac{1}{2}$ e 1, que foram posteriormente ampliados para uma infinidade de valores entre 0 e 1. Com base na teoria desenvolvida por Lukasiewicz, um professor da Universidade da Califórnia, Lotfi Asker Zadeh, desenvolveu a teoria lógica Fuzzy, em 1965. (ABAR, 2004)

A ideia principal da teoria da lógica Fuzzy é a utilização de conceitos subjetivos utilizados no cotidiano das pessoas, como, por exemplo:

- Veículo "rápido" ou "lento"
- Homem "alto" ou "baixo"
- Relógio "caro" ou "barato"

Os adjetivos definidos para os substantivos são vagos, não definem um valor exato para as preposições, assim é a lógica Fuzzy, ela é aplicada a situações onde não se pode simplesmente responder um sim ou não. Não existe nada que determine o que são exatamente veículos rápidos ou lentos, homens altos ou baixo e relógios caros ou baratos, tudo depende de um referencial. Para este referencial, há as funções de pertinência, da qual possuem graus de pertinência, estas, funções que permitem referenciar, por exemplo, o quão rápido é um veículo dentro de um universo de discurso (domínio). Dentro desse universo de discurso, não existem limites bem

definidos, mas os graus de pertinência, um exemplo dos graus de pertinência seria citar que um veículo rápido seria um veículo que atinge 120 km/h e lento quando não atinge os 120 km/h, mas um veículo a 119 km/h não pode ser definido como lento, pelo conhecimento popular visto que atinge quase os 120 km/h, então neste ponto que se apresenta o grau de pertinência, quando este veículo a 119 km/h, seria um veículo rápido, com um grau de pertinência abaixo de 1, sendo 1 o grau de pertinência para a velocidade de 120 km/h (ABAR, 2004).

Outra característica importante a ser citada é que a lógica Fuzzy, por possuir n funções de pertinência, cada qual com seu grau de pertinência para uma suposta preposição, possui regras de interação definidas, que utilizam conectivos lógicos E, OU, NÃO e SE-ENTÃO para se obter a resposta desejada para saída. Um exemplo de regras é o apresentado na Tabela 3, na seção 3.4 que utiliza o conectivo E entre as funções de pertinência para se obter o valor de saída desejável.

2.4.1 Método de inferência Takagi-Sugeno

A metodologia aplicada para o método de inferência Takagi-Sugeno, se apresenta na forma descrita pelo conectivo lógico SE-ENTÃO (Equação 5), do qual representa uma relação linear entre uma entrada e saída de sistemas não lineares, por sistemas dinâmicos lineares, localmente válidos e interpolados (TANAKA; WANG, 2001).

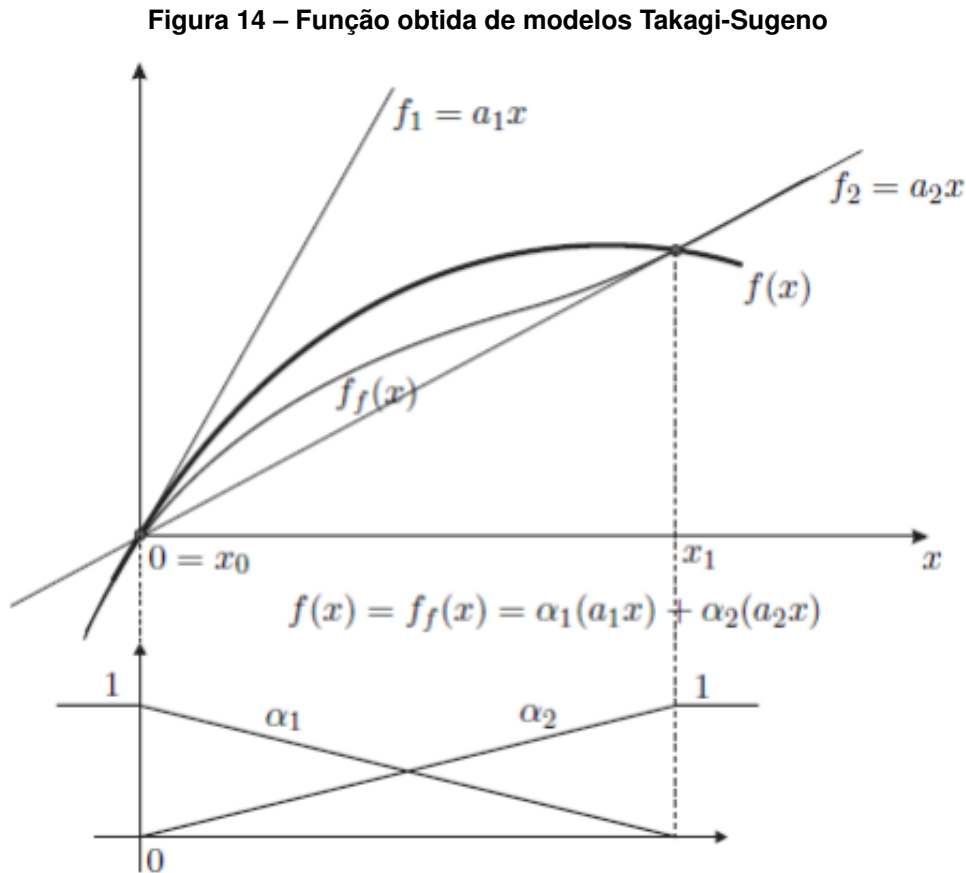
$$R : \begin{cases} SE & x \text{ é } A \text{ (premissa)} \\ ENTÃO & y \text{ é } B \text{ (consequência)} \end{cases} \quad (5)$$

Onde R é o identificador da regra, A e B são variáveis e x e y são elementos dos universos X (entradas) e Y (saídas) respectivamente (SILVA COELHO, C. S.; COELHO, M. A., 2012).

Segundo Mozelli (2012), os modelos que utilizam a metodologia Takagi-Sugeno, possuem capacidade ilimitada de aproximação em um domínio compacto. Assim, apresentam uma aproximação para os sistemas não-lineares através de combinações de modelos locais lineares com as funções de pertinência (SILVA COELHO, C. S.; COELHO, M. A., 2012).

A Figura 14 apresenta um modelo de função não linear sendo aproximado por

funções lineares, através do método Takagi-Sugeno.



FONTE: Silva Coelho (2012)

Considerando a função $f(x)$ não-linear, inicialmente, aproximada por $f_1(x) = a_1x$ para todo $x = 0$, uma reta tangente a curva no ponto $x = 0$, obtém-se a primeira aproximação linear. Outra aproximação realizada é definida por $f_2(x) = a_2x$ para $x = x_2$. Observando que a aproximação linear direta não é satisfatória, pode-se assumir que $f_1(x)$ e $f_2(x)$ são modelos locais e $= a_1x$ e $= a_2x$, funções de pertinência trapezoidais apresentadas na Figura 14. Assim define-se o modelo Fuzzy Takagi-Sugeno para função $f(x) = f_f = a_1(x)f_1(x) + a_2(x)f_2(x)$, um modelo mais eficaz de aproximação do modelo não-linear de $f(x)$, que se apresenta cada vez melhor, no decorrer do aumento dos modelos locais e funções de pertinência, mas aumentando também o esforço do sistema de controle e dificuldade de projeção (SILVA COELHO, C. S.; COELHO, M. A., 2012).

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Para a análise do funcionamento de um FLC (Fuzzy Logic Control - Controlador Lógica Fuzzy) aplicado à frenagem regenerativa, inicialmente deve-se adentrar no aspecto construtivo do veículo adotado na simulação do ADVISOR, aspectos atribuídos segundo a Tabela 1.

Tabela 1 – Dados do veículo atribuídos no ADVISOR

Variável	Modelo	Característica
Vehicle	VEH_SMCAR	Modelo de EV leve presente no ADVISOR
Energy Storage	ESS_LI7_temp	Bateria de lítio-íon
Motor	MC_PM49	Motor de Rotor de ímã permanente de 49kW
Transmission	TX_1SPD_IDEAL	Trasmissão de uma marcha ideal
Wheel/Axle	WH_SMCAR_IDEAL	Modelo de rodas e eixo com coeficientes de resistência a rolagens constantes
Accessory	ACC_CONV	Acessórios de energia constantes
Powertrain Control	PTC_EV	Controle de transmissão manual presente no modelo de EV

Fonte: Autoria própria (2021)

Para o projeto de simulação do sistema de freios regenerativos controlados por um FLC, podemos separar em três características veiculares escolhidas para o modelo, sendo elas, a bateria (*Energy Storage*), o motor (*Motor*) e a transmissão (*Transmission*).

Outras variáveis do modelo, como *Wheel/Axle* (Roda/Eixo), *Accessory* (Acessórios) e *Powertrain Control* (Controle do Trem de Força) são utilizadas os padrões do modelo VEH_SMCAR, visto que não são variáveis essenciais para a análise do sistema de frenagem regenerativa, ou por não possuírem outra opção para substituir a escolhida, o caso da *Powertrain Control*, que segundo modelo do ADVISOR para EVs, há apenas o modelo PTC_EV.

3.1 BATERIA

O modelo proposto segue o exemplo de um veículo pequeno, por isso foi selecionado para as baterias do veículo elétrico proposto, módulos de lítio-íon, baterias mais leves e com maior capacidade energética por módulo, como pode ser visto na relação de peso e carga fornecidas através do ADVISOR (Tabela 2).

Tabela 2 – Relação de tensão e massa de baterias por módulo apresentados no ADVISOR

Material	Modelo ADVISOR	Massa	Tensão	Tensão/Massa
Pb	ESS_PB104	30	12,3	0,41
	ESS_PB12	4,8	12,3	2,56
	ESS_PB16	6,3	12,33	1,96
	ESS_PB18	6,67	12,6	1,89
	ESS_PB25	11	12,33	1,12
	ESS_PB25_IDEAL	11	12,33	1,12
	ESS_PB28	11,8	10,6	0,9
	ESS_PB65_FocusEV	19,5	12,6	0,65
	ESS_PB85	24,9	11,93	0,48
	ESS_PB91	24,9	12,33	0,5
	ESS_PB91_ucd	26,6	12,13	0,46
Li-Ion	ESS_LI7_temp	1,13	10,67	9,41
NiMH	ESS_AnnexVII_SHEV_NIMH28	3,6	6,7	1,86
	ESS_NIMH28_OVONIC	3,6	6,7	1,86
	ESS_NIMH45_OVONIC	8,4	13,4	1,6
	ESS_NIMH6	1	7,7	7,7
	ESS_NIMH60_OVONIC	11,6	13,4	1,16
	ESS_NIMH80_EV1_draft	11,6	13,4	1,16
	ESS_NIMH850_temp	972	77,4	0,08
	ESS_NIMH90_OVONIC	16,7	13,4	0,8
	ESS_NIMH93	17,9	14,23	0,8
Cap	ESS_ULTCAP2	0,4	1,77	4,42
NiCd	ESS_NICAD102	14	6,37	0,45
NiZn	ESS_NIZN22_temp	6,33	12,27	1,94

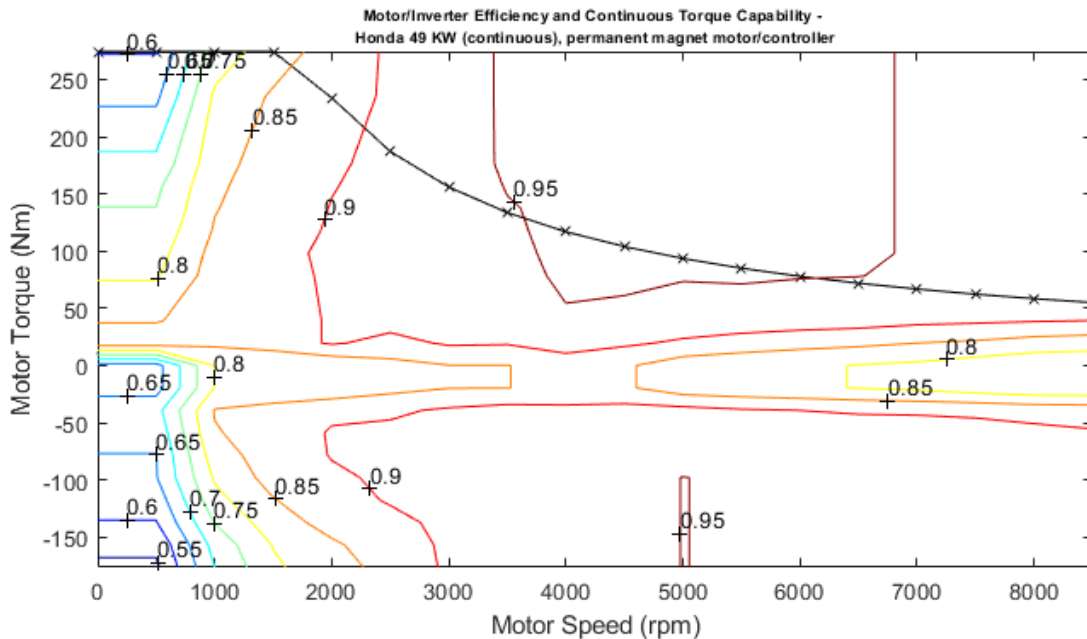
Fonte: Autoria própria (2021)

Por padrão, para o modelo de veículo VEH_SMCAR, são adotadas uma quantidade de vinte e cinco (25) módulos, após testes rápidos, pode-se identificar que o número de módulos não seriam o suficiente para a proposta desejada, visto que o motor padrão para o VEH_SMCAR, estaria consumindo toda carga, por isso foram selecionados o número de trinta (30) módulos de lítio-íon, com uma capacidade de 320 V e uma massa de 34 kg.

3.2 MOTOR

Após a configuração completa dos módulos da bateria, foi selecionado um motor de ímãs permanentes, com uma potência de 49 kW, visto que motores síncronos possuem uma melhor eficiência (Figura 15), são menores, mais leves, mais silenciosos e possuem um alto torque em baixa velocidade, quando comparados a motores de indução (assíncronos).

Figura 15 – Mapa de eficiência motor de ímã permanente de 49kW



Fonte: ADVISOR (2021)

Pode-se apontar sobre a seleção deste motor, a não necessidade de se utilizar um com alta potência e alcance altas velocidades, visto que para uma análise de um sistema de freios regenerativos, um veículo que rode em rodovias em alta velocidade, não apresenta dados tão relevantes para uma análise quanto um veículo que roda por um trajeto urbano com alto nível de alteração de velocidade e alta quantidade de frenagem, trajeto que será descrito quando abordado o ciclo de condução na seção 3.4.

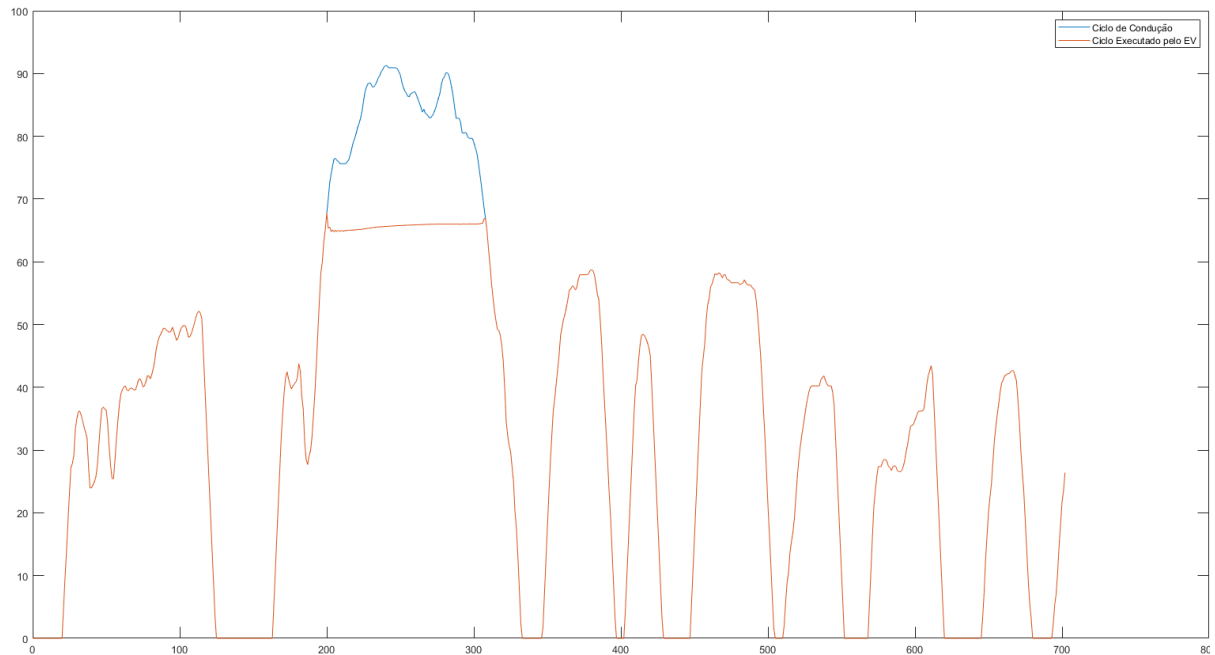
Os motores de síncronos de ímãs permanentes, possuem uma construção mais cara, devido ao custo dos ímãs permanentes e necessitam de dispositivos de partida, mas são amplamente empregados nos VEs e híbridos de baixo custo, como Toyota Prius, Nissan Leaf e Kia Soul EV. Os motores de indução assíncronos, embora mais pesados e menos eficientes também são utilizados em alguns veículos elétricos que possuem maior demanda de potência, como o superesportivo Tesla Model S e as SUVs Tesla Model X e Toyota RAV4 EV (NEOCHARGE, 2020).

3.3 TRANSMISSÃO

Inicialmente, para a transmissão do veículo, fora selecionado o câmbio modelo chamado TX_5SPD_IDEAL, sendo um câmbio manual de cinco velocidades. Pensava-

se que por atribuir um motor com menor potência, para atingir uma velocidade mais alta, seria necessário um motor com uma relação maior de marchas, o que se provou um pensamento errôneo, visto que o motor não conseguia responder à velocidade exigida no ciclo de condução, como pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 – Ciclo de condução x ciclo de condução executado pelo VE com câmbio de cinco velocidades



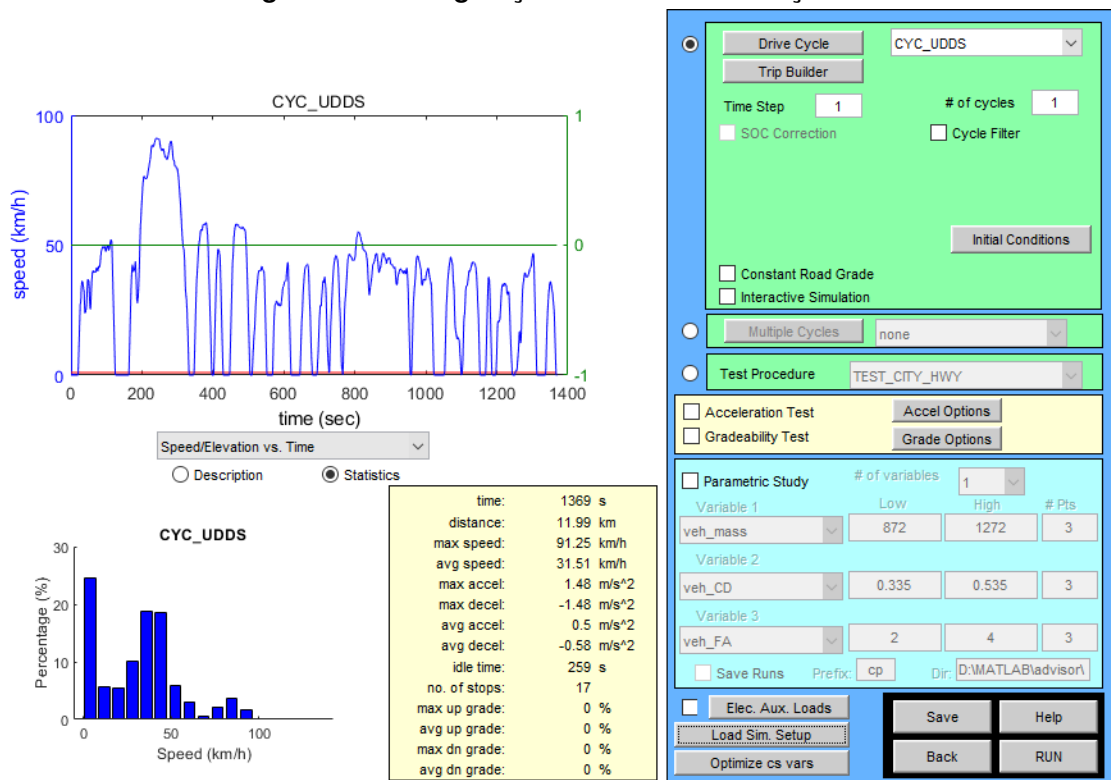
Fonte: Autoria Própria (2021)

Após observado o resultado acima, foi testado um câmbio modelo TX_1SPD_-IDEAL, sendo um câmbio manual com engrenagem fixa, sendo então com uma única relação de transmissão. Esta categoria de transmissão se adequou ao projeto e apresentou um resultado desejado para a modelagem do veículo no ADVISOR.

3.4 CICLO DE CONDUÇÃO

Durante o ciclo de condução urbano, pode-se analisar mais facilmente as ações de funcionamento de uma frenagem regenerativa presente em um veículo, visto que as ações realizadas em perímetro urbano apresentam, uma velocidade mais inconstante, com baixa velocidade, e maior quantidade de frenagem, e desta forma é o ciclo de condução mais adequado para o modelo de simulação apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Configuração do ciclo de condução



Fonte: ADVISOR (2021)

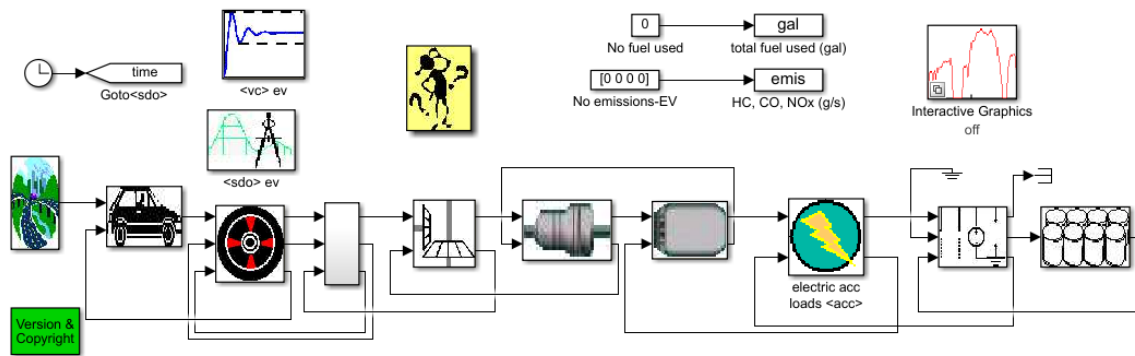
O ciclo de condução definido apresenta como característica um tempo de 1369 (mil trezentos e sessenta e nove) segundos (s) de duração, por uma distância de 11,99 (onze, noventa e nove) quilômetros (km), alcançando uma velocidade máxima de 91,25 (noventa e um, vinte e cinco) quilômetros por hora (km/h), com uma velocidade média de 31,51 (trinta e um, cinquenta e um) quilômetros por hora (km/h), com um número de 17 (dezesete) paradas durante o percurso.

Definidos bateria, motor, transmissão e qual o ciclo que o veículo percorrerá, o próximo passo é a definição do FLC e sua implementação no modelo do ADVISOR.

3.5 ESTRUTURA DO SISTEMA DE FRENAGEM REGENERATIVA E DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE

O modelo de veículo, previamente configurado, pode ser representado por diagramas de blocos, presentes no ADVISOR, estes podem ser visualizados na Figura 18.

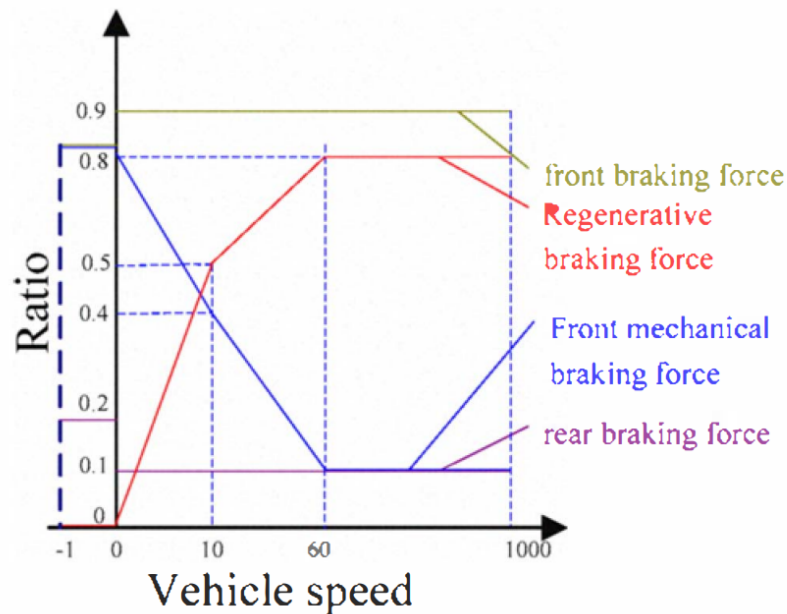
Figura 18 – Modelo de blocos do VE



Fonte: ADVISOR/Simulink (2021)

Conforme a necessidade estabelecida pelo ciclo de condução, quando realizada a frenagem, o sistema envia para o bloco "<vc> ev" (Módulo de controle do veículo) os valores relativos à força de frenagem necessária, onde este módulo distribui as forças necessárias entre os eixos dianteiro e traseiro do veículo. Esta distribuição de força é regulada conforme a velocidade do veículo como pode ser visto na Figura 19 (ZHANG, Zijian et al., 2010).

Figura 19 – Distribuição de forças conforme a velocidade



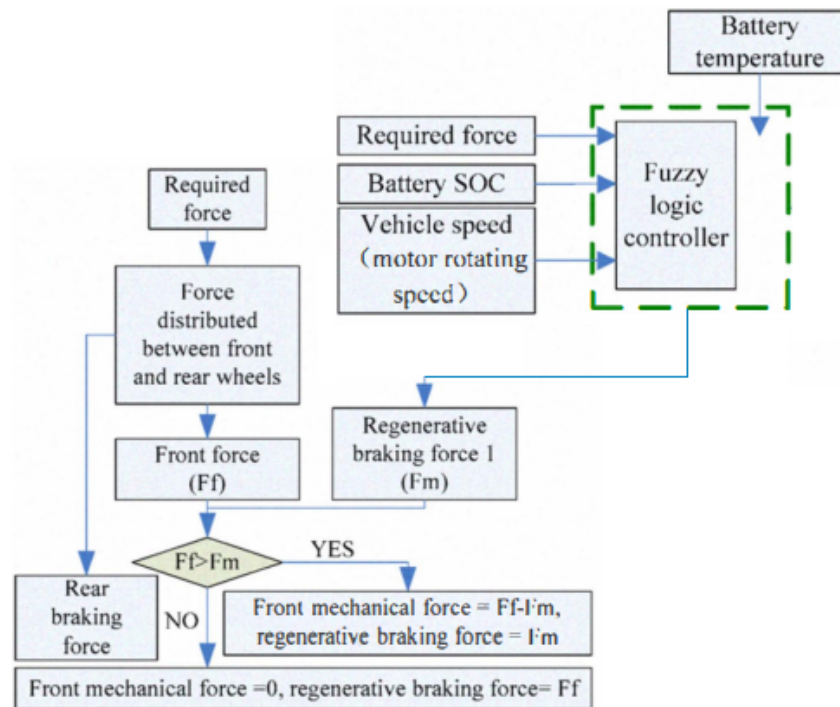
Fonte: ZHANG (2010)

A estrutura da frenagem regenerativa trabalha conforme a força requerida para a frenagem, esta força requerida será distribuída entre os eixos dianteiros e traseiros do veículo. A força de frenagem necessária para a frenagem regenerativa é a força

enviada para o eixo dianteiro, as forças exercidas pelo eixo traseiro, não são aplicadas ao nosso modelo de frenagem regenerativa.

Segundo ZHANG, Zijian et al. (2010) , pode-se obter o valor da força de frenagem regenerativa que é o valor máximo que possa garantir a segurança de frenagem e a segurança das baterias seguindo a estrutura apresentada na Figura 20. Então, comparando força no eixo dianteiro (F_f) com força de frenagem regenerativa (F_m), a estratégia de controle determinará o valor da força de frenagem mecânica dianteira. Se $F_f > F_m$, a força de frenagem mecânica dianteira é igual a $F_f - F_m$ e a força de frenagem regenerativa é igual a F_m , se $F_f = F_m$, a força de frenagem mecânica dianteira é igual a 0 e a força de frenagem regenerativa é igual a F_f .

Figura 20 – Estrutura da estratégia de frenagem e controle

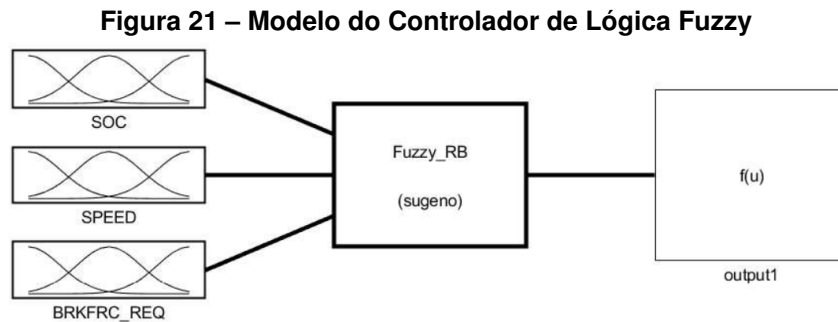


Fonte: Adaptado de ZHANG (2010)

A força de frenagem regenerativa, é calculada a partir de um FLC, como observado na Figura 20. As principais entradas destacadas no FLC são força de frenagem requerida, o SOC (State of Charge - Estado de Carga) da bateria e a velocidade do veículo. (ZHANG, Zijian et al., 2010)

Para o projeto do FLC, utilizou-se um modelo de controlador fuzzy Sugeno, visto que nossa saída exige um valor numérico para as futuras operações realizadas na simulação da frenagem regenerativa e o modelo Sugeno possui uma alta eficiência além de garantir uma saída contínua (ZHANG, Hao et al., 2012).

O FLC como apresentado na Figura 21 consiste em um modelo de três (3) entradas e uma (1) saída.



Fonte: Autoria própria (2021)

A temperatura da bateria é uma entrada de segurança, não ligada diretamente ao FLC, mas sim à estratégia de controle, como um limitador de segurança para a vida útil da bateria e do VE (ZHANG, Zijian et al., 2010).

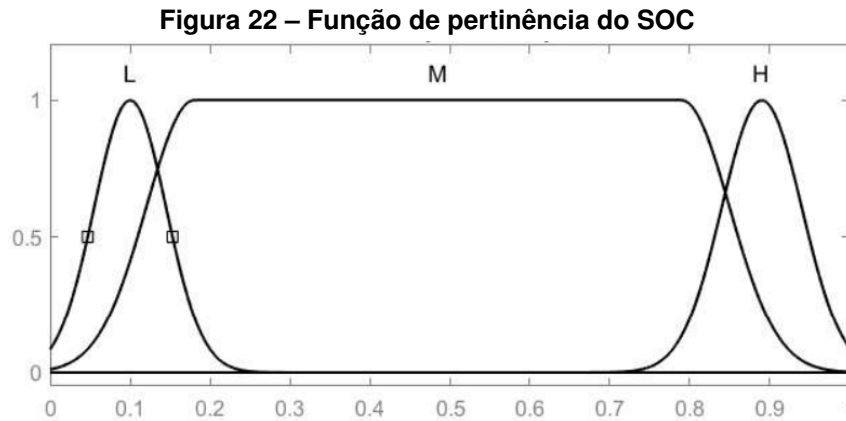
A relação entre a frenagem regenerativa e a temperatura da bateria determina a máxima corrente permitida para carga, expressa conforme Equação 6 abaixo. (FENG, Wen et al., 2008):

$$K_t = \begin{cases} K_{t1}e^{K_{t2}T} & -20^{\circ}C \leq T < 20^{\circ}C \\ 1 & 20^{\circ}C \leq T < 45^{\circ}C \\ (50 - T) & 45^{\circ}C \leq T < 50^{\circ}C \\ 0 & T < -20^{\circ}C \text{ ou } T > 50^{\circ}C \end{cases} \quad (6)$$

Na equação 5, tem-se que K_t é o coeficiente de compensação, enquanto K_{t1} e K_{t2} são coeficientes construtivos e variam conforme a montadora do VE. Neste caso, são utilizados os valores propostos por ZHANG, Zijian et al. (2010), utilizando $K_{t1} = 0,33$ e $K_{t2} = 0,0549$.

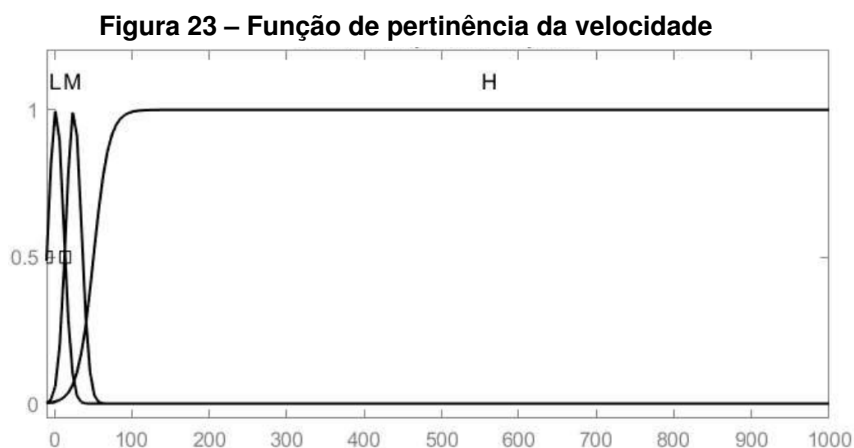
Segundo ZHANG, Zijian et al. (2010), quando o SOC da bateria está abaixo de 10%, a resistência interna da bateria apresenta um valor elevado, o que dificulta o recarregamento da bateria através da frenagem regenerativa, logo a parcela de frenagem regenerativa deve ser pequena, entre 10% e 90%, a bateria aceita carga máxima proveniente da frenagem, sendo o ponto ideal para recepção da carga e então quando o SOC da bateria ultrapassa os 90%, ela entra em um ponto de controle, onde deve-se reduzir a corrente de carga, para evitar sobrecargas e problemas com as baterias.

Desta forma, tem-se a primeira função de pertinência, definida em baixa (L), média (M) e alta (H) com um universo de discussão [0,1], como apresentado na Figura 22(ZHANG, Hao et al., 2012).



Fonte: Autoria própria (2021)

A velocidade de um veículo influencia diretamente na força de frenagem necessária, visto que quanto maior for a velocidade de deslocamento de um objeto, maior será a força necessária para parar este movimento. Diante disso, tem-se que quanto maior for a velocidade do veículo, maior será a força de frenagem regenerativa aplicada, sendo assim, definida a segunda função de pertinência, observada na Figura 23. A função é definida em baixa(L), média (M) e alta (H) em um universo de discurso que compreende de 0 a 1000 (ZHANG, Hao et al., 2012).

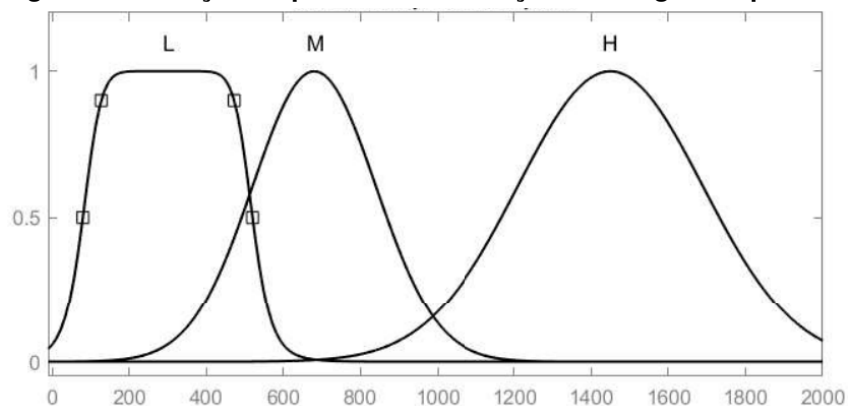


Fonte: Autoria própria (2021)

A relação entre a força de frenagem requerida e a frenagem regenerativa é inversamente proporcional, visto que, quanto maior for a força exercida para a frenagem, significa que o condutor do veículo, necessita que este diminua mais rapidamente a

velocidade, em um tempo menor e com menor deslocamento, indo do movimento à parada total, assim, quanto maior for a força aplicada sobre o pedal do freio, maior será a força de frenagem requerida e menor será a força de frenagem regenerativa, esta sendo aplicada com maior intensidade, quando o condutor define rápidas frenagens. Assim, a função de pertinência é definida como baixa (L), média (M) e alta (H) como pode ser vista na Figura 24, com universo de discurso de [-10, 2000] (ZHANG, Zijian et al., 2010).

Figura 24 – Função de pertinência da força de frenagem requerida



Fonte: Autoria própria (2021)

Como indicado anteriormente, o FLC precisa de uma saída constante, por isso, a função de pertinência da saída, é um conjunto de 11 (onze) saídas, de 0 a 1, sendo $mf0 = 0$ e $mf10 = 1$, variando a cada 0,1, este conjunto sendo $f(u) = (mf0, mf1, mf2, mf3, mf4, mf5, mf6, mf7, mf8, mf9, mf10)$.

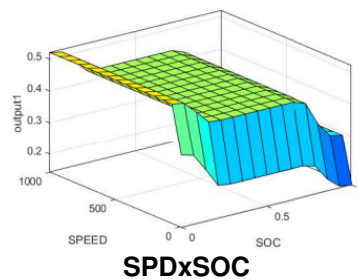
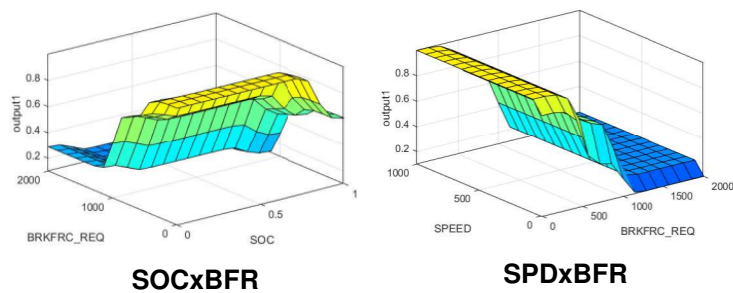
Com base nas afirmações realizadas anteriormente, propostas por ZHANG, Zijian et al. (2010) e ZHANG, Hao et al. (2012), tem-se, a partir das três entradas, a tabela de regras para execução do FLC, obedecendo à lógica "SE α valor de SOC (SOC) E β valor de Velocidade (SPD) E γ Força de Frenagem Requerida (BFR), Então δ valor de $f(u)$ ". Logo tem-se a tabela de regras observada na Tabela 3 com as superfícies gráficas das regras apresentadas na Figura 25:

Tabela 3 – Tabela de regras definidas para o FLC

SOC	SPD	BFR	f(u)
H	H	H	0,1
H	H	M	0,1
H	H	L	0
H	M	H	0,2
H	M	M	0,2
H	M	L	0,1
H	L	H	0,3
H	L	M	0,3
H	L	L	0,2
M	H	H	0,5
M	H	M	0,3
M	H	L	0,3
M	M	H	0,7
M	M	M	0,5
M	M	L	0,4
M	L	H	0,8
M	L	M	0,8
M	L	L	0,6
L	H	H	0,6
L	H	M	0,5
L	H	L	0,4
L	M	H	1
L	M	M	1
L	M	L	0,9
L	L	H	1
L	L	M	1
L	L	L	0,9

Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 25 – Superfície gráfica das regras do FLC

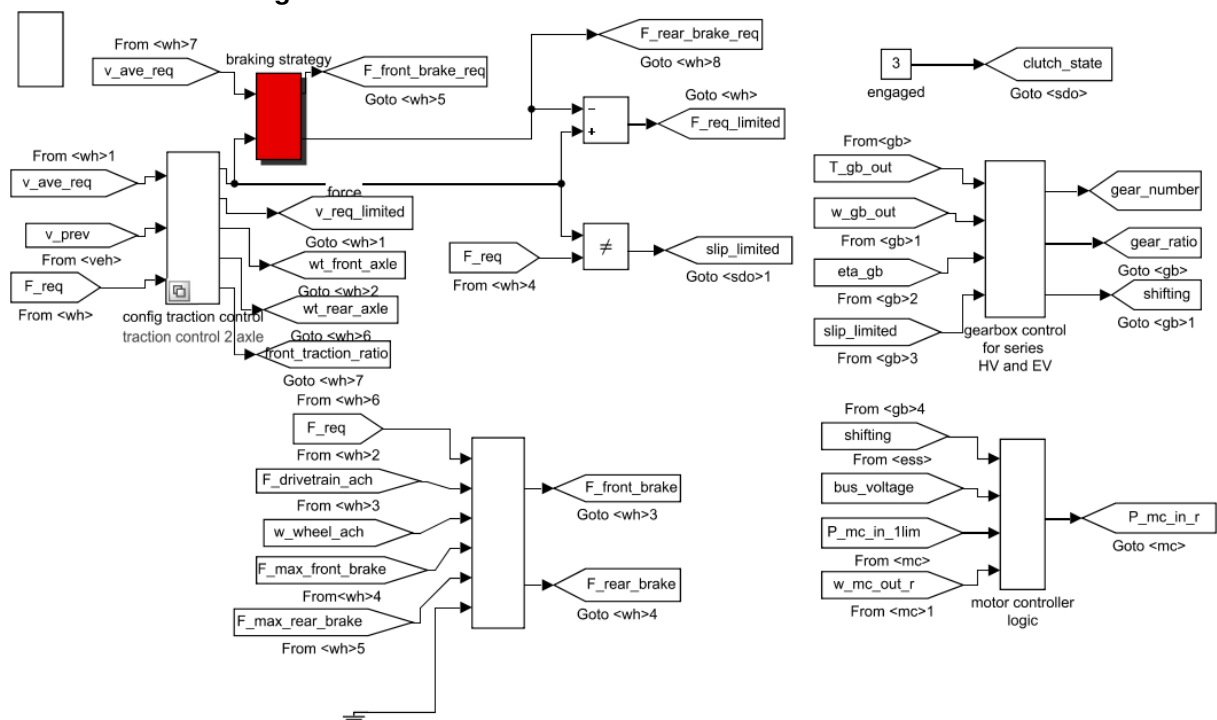


Fonte: Autoria própria (2021)

3.6 MODIFICAÇÃO DO MÓDULO DE CONTROLE DO VEÍCULO NO SIMULINK

Na interface do ADVISOR, possuía-se a opção de visualização dos diagramas de bloco utilizados pelo programa para simular o veículo requerido, como apresentado anteriormente na Figura 18. Entre os diversos sistemas e subsistemas presentes nesta modelagem dentro do Simulink, há um bloco chamado **<vc> ev**, sendo este o sistema que reúne todos os subsistemas de controle do veículo, entre eles, destaca-se em especial o bloco **braking strategy**, bloco destacado em vermelho na Figura 26.

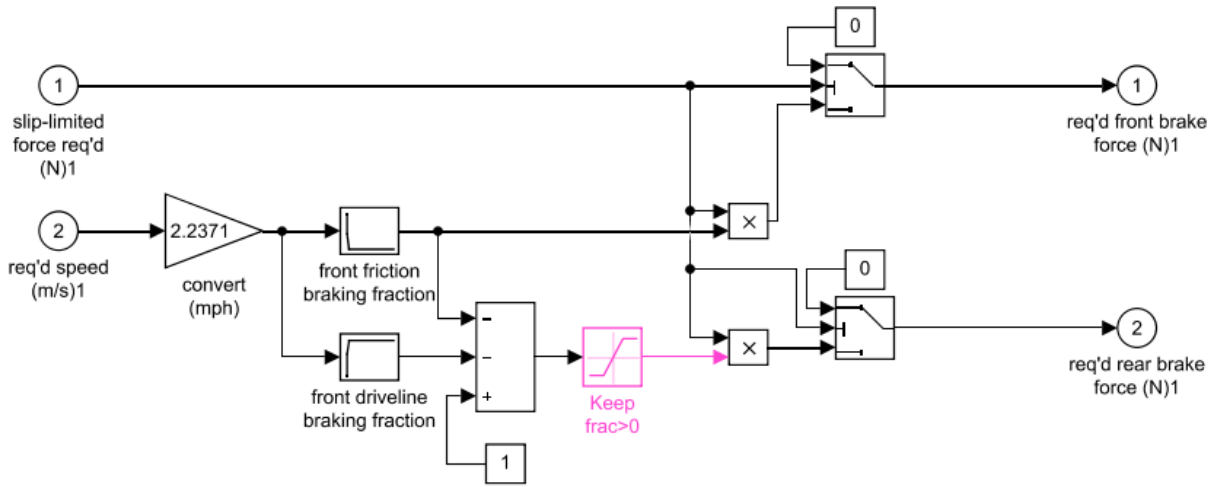
Figura 26 – Sistema – Módulo de controle do VE "<vc> ev"



Fonte: Autoria própria (2021)

Abrindo o subsistema *braking strategy*, é visualizado os diagramas de blocos que representam a estratégia de frenagem mecânica adotada pelo ADVISOR para o EV, apresentado na Figura 27.

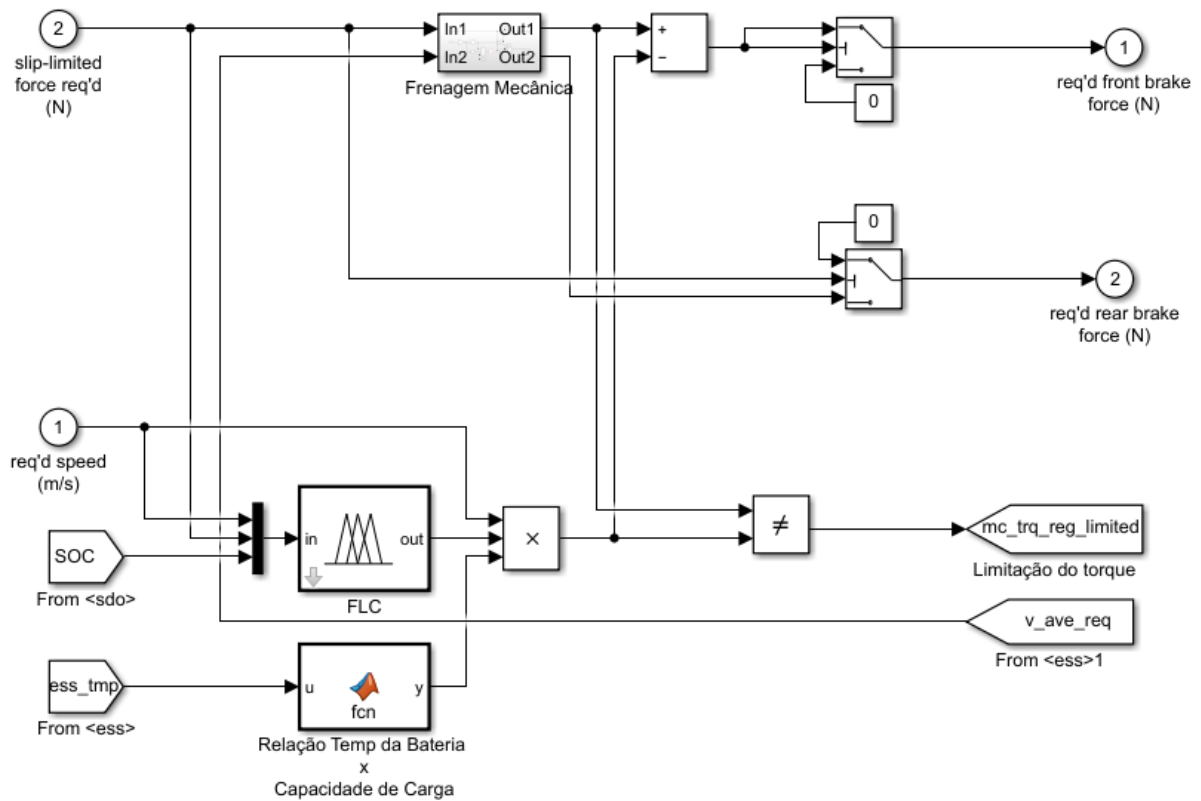
Figura 27 – Sistema – Estratégia de frenagem mecânica



Fonte: Autoria própria (2021)

A partir do modelo apresentado, é possível aplicar as modificações propostas por ZHANG, Zijian et al. (2010) e ZHANG, Hao et al. (2012), para assim ser simulado um sistema de frenagem regenerativa por meio do ADVISOR, utilizando um FLC, modificação esta, apresentada na Figura 28.

Figura 28 – Sistema – Estratégia de frenagem regenerativa



Fonte: Autoria própria (2021)

Nos blocos apresentados na Figura 28, destaca-se em especial dois blocos, o bloco "FLC", que carrega as informações desenvolvidas na seção 3.5, do qual é responsável pela lógica que irá fornecer o valor de F_m , valor necessário para o cálculo da força de frenagem (Figura 20) e o bloco "Relação Temp da Bateria x Capacidade de Carga" que é um bloco de função do *Matlab*, o qual carrega a Equação 6 apresentada também na seção 3.5.

O bloco "Frenagem Mecânica" é todo o sistema de estratégia da frenagem mecânica apresentada anteriormente na Figura 27, pois ainda há a atuação do freio mecânico. A saída "Out1" do bloco "Frenagem Mecânica" é a força de frenagem dianteira (F_f), esta saída será comparada com o valor da saída do FLC (F_m), podendo ocorrer duas situações nesta comparação:

$$\text{Se } F_f > F_m \left\{ \begin{array}{l} \textit{Verdade} \quad \text{Força de frenagem} = F_f - F_m \\ \text{Força de frenagem regenerativa} = F_m \\ \textit{Falso} \quad \text{Força de frenagem} = 0 \\ \text{Força de frenagem regenerativa} = F_f \end{array} \right. \quad (7)$$

Assim definida a estratégia de frenagem no Simulink, pode-se então realizar os testes desejados para obter valores que possam ser analisados e possam responder se há alguma vantagem na utilização de uma frenagem regenerativa, utilizando um FLC para controle do sistema de frenagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da configuração abordada no capítulo anterior, com todos os parâmetros ajustados, a simulação foi realizada, apresentando os resultados a serem vistos e analisados neste capítulo.

4.1 SOC DA BATERIA E CICLO DE CONDUÇÃO

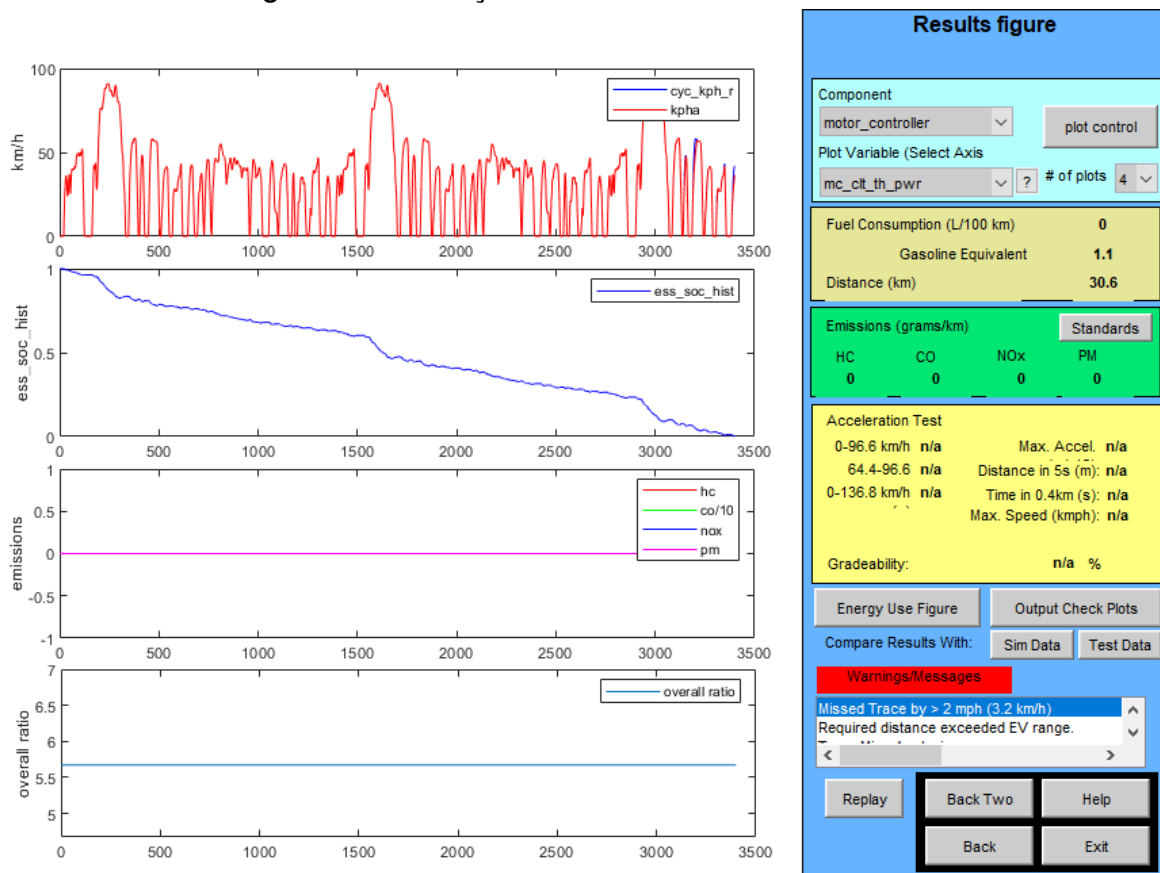
Inicialmente foi realizada a simulação do modelo de veículo elétrico com os parâmetros definidos na Tabela 1. Na Figura 29 e Figura 30, pode-se verificar ambas as simulações, com o sistema convencional do ADVISOR para o VE, que utiliza a estratégia de frenagem da Figura 27 e a simulação com o sistema modificado do ADVISOR que utiliza a estratégia de frenagem com FLC apresentada na Figura 28, respectivamente.

Figura 29 – Simulação do VE - Modelo convencional



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 30 – Simulação do VE - Modelo modificado

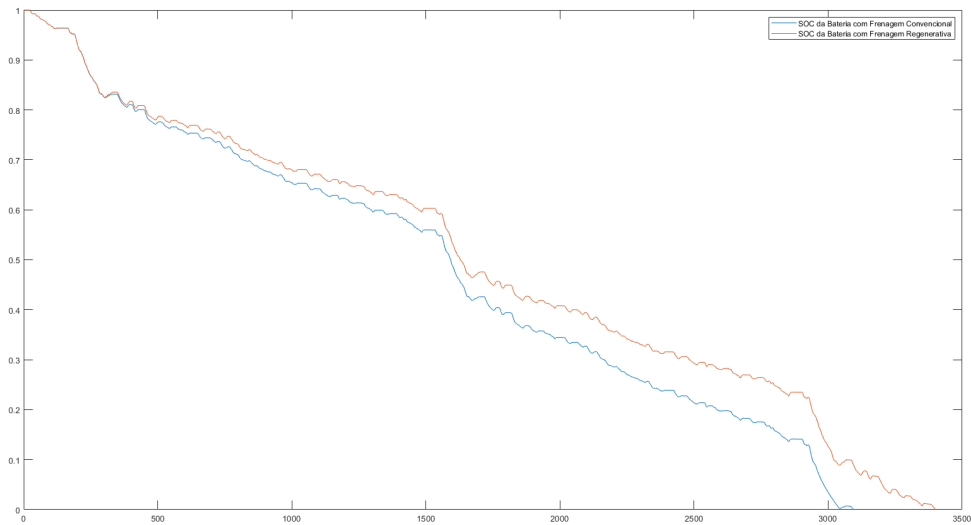


Fonte: Autoria própria (2021)

Prontamente se observa na Figura 30 que por ser um VE, a emissão de gases atmosféricos é nula, sendo que em um veículo a combustão ou em veículos híbridos, isto não seria possível.

Outro ponto importante é que com o mesmo equivalente de combustível, o modelo modificado, teve um deslocamento de 30,6 km, contra os 28,1 km do modelo convencional do ADVISOR. Isso indica que houve um aumento de 2,5 km na autonomia do VE, com a aplicação da frenagem regenerativa em um modelo sob as mesmas condições de simulação. Essa melhoria de autonomia pode ser verificada por meio da Figura 31 e Figura 32 a seguir.

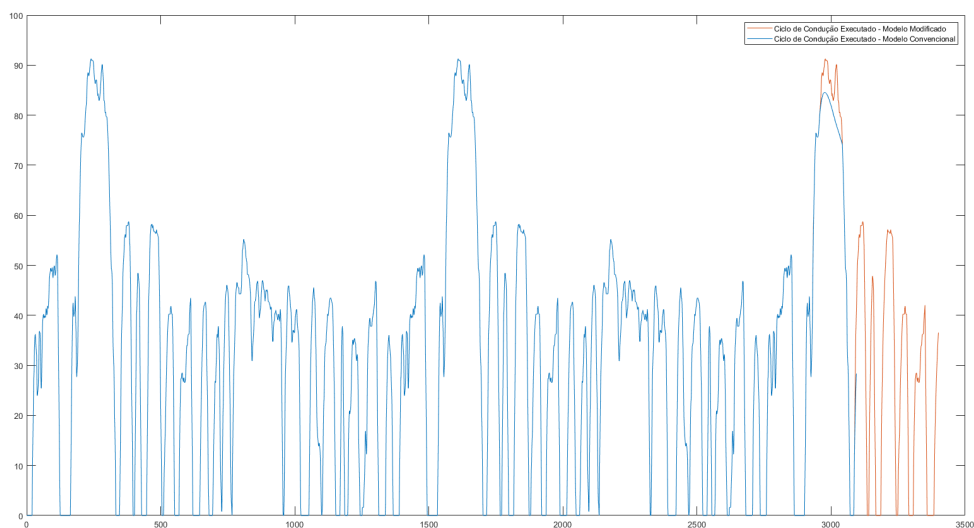
Figura 31 – SOC da Bateria no modelo convencional x modificado



Fonte: Autoria própria (2021)

Na Figura 31, é possível observar a comparação entre o SOC da bateria do VE no modelo convencional (em azul) e o SOC da bateria do VE no modelo modificado (em laranja), tal figura é muito similar ao modelo apresentado por ZHANG, Zijian et al. (2010) e ZHANG, Hao et al. (2012), apresentando alterações devido a escolhas diferentes do ciclo de condução, do modelo do motor e das baterias entre o modelo apresentado na literatura e o utilizado neste trabalho.

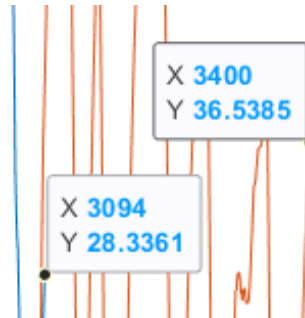
Figura 32 – Ciclo de condução executado no modelo convencional x modificado



Fonte: Autoria própria (2021)

A partir da Figura 32, é possível observar o ciclo de condução executado pelo modelo convencional (azul) em comparação com o ciclo de condução executado pelo modelo modificado (laranja). Há uma diferença de 306 s de tempo de condução (eixo x do gráfico) a mais para o modelo modificado utilizando a mesma bateria para ambos os modelos exibidos na Figura 33.

Figura 33 – Diferença em segundos (eixo x) do ciclo de condução executado no modelo convencional x modificado



Fonte: Autoria própria (2021)

4.2 EFICIÊNCIA DO VEÍCULO

Por meio da simulação dos modelos, convencional do ADVISOR e modificado, pode-se observar que houve uma mudança nos valores apresentados pelo veículo para entradas, saídas e perdas em alguns sistemas veiculares, onde ambos utilizam os mesmos parâmetros de simulação, tanto no *POWER MODE*, quanto no *REGEN MODE* apresentados na Tabela 4. Essas mudanças afetam diretamente a eficiência do VE.

Tabela 4 – Relação de dados dos sistemas do VE

Modo	Modelo		Motor/Controller	Gearbox	Final Drive	Wheel/Axle
<i>POWER MODE</i>	Convencional	In	8977	7687	7687	7687
		Out	7687	7687	7687	7687
		Loss	1290	0	0	0
		Eff	86%	100%	100%	100%
	Modificado	In	9930	8476	8476	8476
		Out	8476	8476	8476	8476
		Loss	1455	0	0	0
		Eff	85%	100%	100%	100%
<i>REGEN MODE</i>	Convencional	In	1474	1474	1474	2792
		Out	1178	1474	1474	2792
		Loss	296	0	0	0
		Eff	80%	100%	100%	100%
	Modificado	In	2709	2709	2709	3158
		Out	2243	2709	2709	3158
		Loss	466	0	0	0
		Eff	83%	100%	100%	100%

Fonte: Autoria própria (2021)

Pode-se observar uma diminuição de 1% na eficiência do VE no *POWER MODE* no modelo modificado em comparação ao modelo convencional, o que pode caracterizar uma pequena perda de potência no VE, mas em compensação, houve um aumento de 3% no *REGEN MODE* o que caracteriza um aumento na capacidade de geração de carga e na própria autonomia do VE .

Desta forma, tem-se uma eficiência geral para todo o sistema do VE convencional e modificado, por meio do cálculo simples representado pela Equação 8, de acordo com a Tabela 5.

$$\frac{AERO + ROLLING}{ENERGY STORED} = EFICIÊNCIA GERAL DO SISTEMA \quad (8)$$

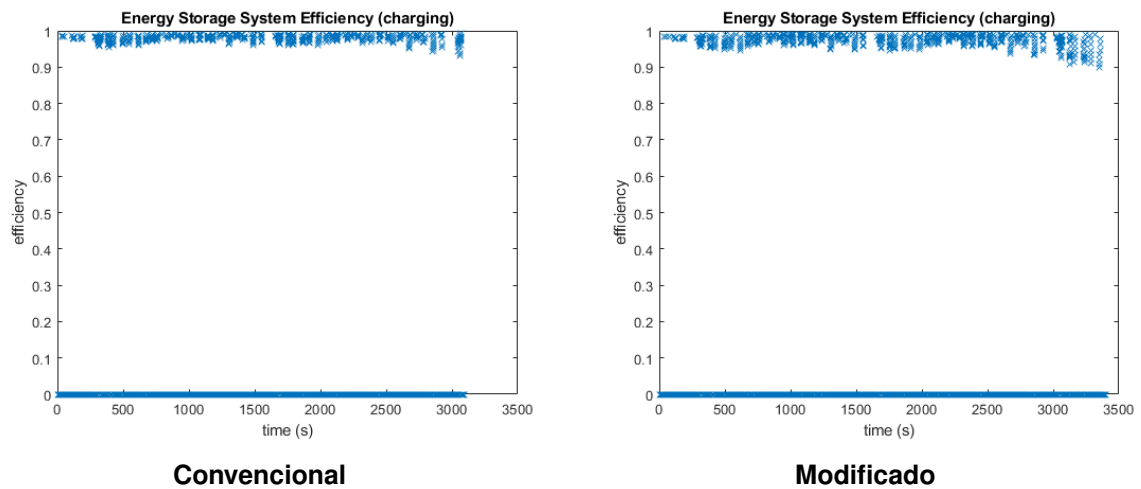
Tabela 5 – Cálculo de eficiência geral do sistema

	Convencional	Modificado
<i>ENERGY STORED</i>	8685	8624
<i>AERO</i>	2722	2907
<i>ROLLING</i>	2171	2355
Eficiência Geral do Sistema	0,56	0,61

Fonte: Autoria própria (2021)

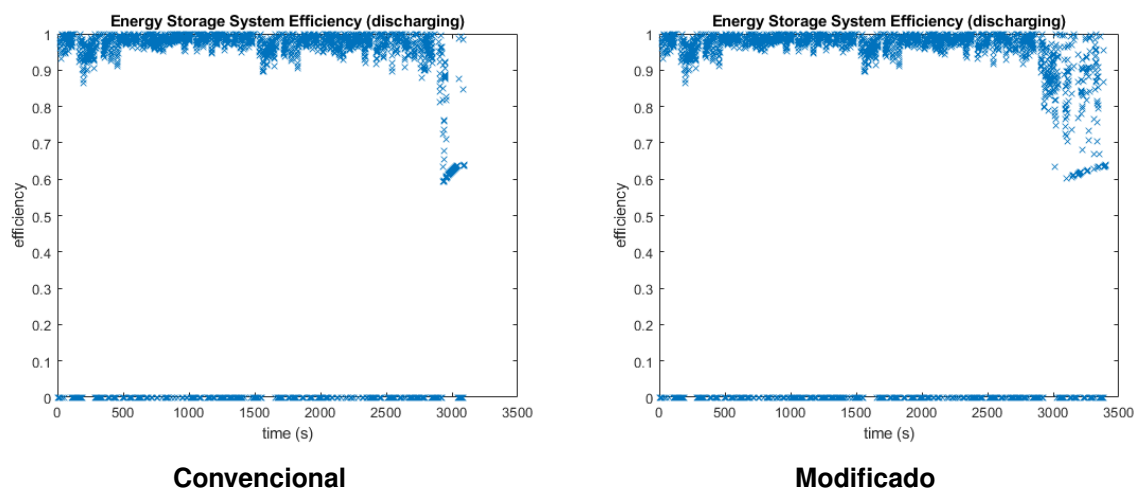
AERO é a quantidade de kJ de energia perdida devido ao arrasto aerodinâmico do veículo, *ROLLING* é a energia em kJ necessária para o veículo superar a resistência ao rolamento durante todo o ciclo de condução e a *ENERGY STORED* é a quantidade de Energia em kJ armazenada nas baterias do veículo.

Figura 34 – Mapa de eficiência de carga da bateria



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 35 – Mapa de eficiência de descarga da bateria



Fonte: Autoria própria (2021)

Na Figura 34 e Figura 35 podem ser observados os mapas de eficiência da atuação de carga e descarga da bateria, onde se tem uma maior contingência de dados para os sistemas modificados, o que resulta em uma maior quantidade de energia movimentada e também com picos menores que o modelo convencional, onde na Figura 34 o menor valor alcançado pelo sistema convencional foi abaixo de 90% e o sistema modificado, ficando acima de 90%, já na Figura 35 o mesmo se repete, mas para picos abaixo de 60% para o modelo convencional enquanto o modelo modificado ficou acima a 60% em seus momentos finais de carga e descarga.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Inicialmente, por meio da frenagem regenerativa, há um avanço em relação a estratégias comuns de frenagem desenvolvidas em veículos. O principal problema enfrentado hoje no desenvolvimento de VEs está relacionado às baterias, visto que a autonomia das baterias e os elevados preços das mesmas, é o que encarece esses veículos. Para se ter uma maior autonomia, aumenta o número de pesquisas relacionados à métodos de aumento de eficiência, novas tecnologias de baterias e novas tecnologias de máquinas elétricas.

O principal ponto observado a partir dos dados obtidos do modelo modificado por meio do *Simulink*, é que a frenagem regenerativa, utilizando-se a metodologia de controle Fuzzy, é mais eficiente para frenagem de um veículo, se comparado ao modelo tradicional utilizado pelo ADVISOR para o VE (modelo VEH_SMCAR).

O sistema desenvolvido para este estudo, considerou uma proposta de FLC que utilizava uma estrutura de 3 entradas, a SOC da bateria, a força de frenagem requerida e a velocidade do veículo, embora sejam as principais variáveis para o processo, há ainda mais variáveis que poderiam ser abordadas, dentre elas, pode ser citado as dimensões veiculares, que afetam toda a dinâmica do veículo, as configurações de suspensão do veículo e como ela se comporta conforme o ciclo de condução, os motores e máquinas elétricas envolvidas na propulsão do veículo e também variáveis mecânicas voláteis que podem se alterar conforme o uso do veículo, como o próprio sistema de frenagem mecânico, composto de pinças, pastilhas de freio e equipamentos hidráulicos e equipamentos de tração, como pneus e rodas do veículo.

Para trabalhos futuros pode ser proposta, uma análise mais aprofundada desta simulação, considerando todos os aspectos citados anteriormente, além da implementação de um modelo físico, onde, além de simular, possa ser verificado na prática, a atuação de um sistema de frenagem regenerativa utilizando um controlador lógica Fuzzy e as vantagens de sua aplicação em relação a uma frenagem convencional.

REFERÊNCIAS

ABAR, Celina. **Lógica Fuzzy**. 2004. PUC SP. Disponível em: <<https://www.pucsp.br/~logica/Fuzzy.htm>>. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; DIAS, H. **Física para Universitários: Eletricidade e Magnetismo**. first. [S.l.]: AMGH Editora Ltda., 2012. Citado na página 25.

BORILI, Rogério. **O futuro do carro e seus impactos na economia, no meio ambiente e nos impostos**. 2020. Revista Online - IstoÉ Dinheiro. Disponível em: <<https://www.istoedinheiro.com.br/o-futuro-do-carro-e-seus-impactos-na-economia-no-meio-ambiente-e-nos-impostos/>>. Citado na página 13.

BOSCH, Robert. **BOSCH: Manual da tecnologia automotiva**. São Paulo, SP: Editora Edgar Blücher, 2005. 1231 p. Citado 4 vezes nas páginas 18, 19, 21 e 22.

CUNNINGHAM, John M. **Karl Benz**. 2020. Encyclopaedia Britannica. Disponível em: <<https://www.britannica.com/biography/Karl-Benz>>. Citado na página 16.

EHSANI, M. et al. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory and Design**. first. [S.l.]: CRC Press, 2004. Citado na página 26.

FENG, Wen et al. **Charging Method for Li-ion Battery Pack in Electric Vehicles**. ninth. [S.l.]: Automotive Engineering, 2008. v. 30. Pp. 792-795. Citado na página 38.

FERNANDES, Daniela. **Por que os carros movidos a gasolina e diesel estão com os dias contados em países europeus e vários emergentes**. 2017. Revista Online - BBC News. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/internacional-42046977>>. Citado na página 13.

GREGERSEN, Erik. **Nicolas-Joseph Cugnot**. 2020. Encyclopaedia Britannica. Disponível em: <<https://www.britannica.com/biography/Nicolas-Joseph-Cugnot>>. Citado na página 16.

KENNEDY, Francis. **Cientistas italianos recriam carro de Leonardo da Vinci**. 2004. Revista Online - BBC News. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/ciencia/story/2004/04/040426_davinci>. Citado na página 16.

MARKEL, T et al. Advisor: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling. **Journal of Power Sources**, v. 110, n. 2, p. 255–266, 2002. ISSN 0378-7753. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775302001891>>. Citado na página 28.

MICHAELIS. **Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa**. Website. Disponível em: <<https://michaelis.uol.com.br/busca?r=0\T1\textbackslash&f=0\T1\textbackslash&t=0\T1\textbackslash&palavra=Automovel>>. Citado na página 16.

MONTEIRO, B. C. R.; MOTTA, L. P. **Frenagem Regenerativa**. jun. 2015 — Universidade de Brasília - UnB, Brasília, jun. 2015. Citado na página 24.

MOZELLI, Leonardo Amaral. **Controle Fuzzy para sistemas takagi-sugeno: condições aprimoradas e aplicações**. 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8CRGJF>>. Citado na página 29.

NEOCHARGE. **Como Funciona o Motor de um Carro Elétrico**. 2020. Website. Citado na página 33.

ORÉFICE, Giovana. **Como funcionam os carros híbridos?** 2019. Revista Online Auto Esporte. Disponível em: <<https://autoesporte.globo.com/carros/noticia/2019/06/como-funcionam-os-carros-hibridos.ghtml>>. Citado na página 13.

PAREDES, Marina Gabriela Sadith Perez. **Frenagem Regenerativa em Veículo Elétrico Acionado por Motor de Indução**: Estudo, simulação e verificação experimental. 2013. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013. Citado na página 26.

SILVA COELHO, C. S.; COELHO, M. A. **MODELAGEM FUZZY TAKAGI-SUGENO APLICADO AO CONVERTOR CC-CC BUCK-BOOST**. 2012 — UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, CURITIBA, PR, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8CRGJF>>. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

TANAKA, Kazuo; WANG, Hua O. **Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach**. USA: John Wiley Sons, Inc., 2001. ISBN 0471323241. Citado na página 29.

ZHANG, Hao et al. **Fuzzy Logic Control in Regenerative Braking System for Electric Vehicle**. 2012 — International Conference on Information and Automation of Shenyang, China, 2012. Citado 5 vezes nas páginas 37, 39, 40, 43 e 47.

ZHANG, Zijian et al. **Regenerative Braking for Electric Vehicle based on Fuzzy Logic Control Strategy**. 2010 — 2010 2nd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE 2010), 2010. Citado 6 vezes nas páginas 36, 37, 38, 40, 43 e 47.