

Marina Gabriela Sadith Perez Paredes

Frenagem Regenerativa em Veículo Elétrico Acionado por Motor de Indução: Estudo, Simulação e Verificação Experimental

Campinas

2013



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS faculdade de engenharia elétrica e de computação

UNICAMP

Marina Gabriela Sadith Perez Paredes

Frenagem Regenerativa em Veículo Elétrico Acionado por Motor de Indução: Estudo, Simulação e Verificação Experimental

Orientador: Prof. Dr. José Antenor Pomilio

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestra em Engenharia Elétrica, na área de Energia Elétrica.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA MARINA GABRIELA SADITH PEREZ PAREDES E ORIENTADA PELO PROF. DR. JOSÉ ANTENOR POMILIO

Campinas

2013

Ficha catalográfica Universidade Estadual de Campinas Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura **Rose Meire da Silva - CRB 8/5974**

P415f	Perez Paredes, Marina Gabriela Sadith, 1981- Frenagem regenerativa em velculo elétrico acionado por motor de indução: estudo, simulação e verificação experimental / Marina Gabriela Sadith Perez
	Paredes. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.
	Orientador: José Antenor Pomilio
	Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
	Engenharia Elétrica e de Computação.
	1. Veículos elétricos. 2. Máguinas elétricas de inducão. I. Pomilio, José
	Antenor, 1960 II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
	Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Regenerative braking in electric vehicle driven by induction motor: study, simulation and experimental verification

Palavras-chave em inglês: Electric vehicle Induction electric machines Área de concentração: Energia Elétrica Titulação: Mestra em Engenharia Elétrica Banca examinadora: José Antenor Pomilio [Orientador] Auteliano Antunes dos Santos Junior Gilmar Barreto Data de defesa: 29-07-2013 Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidata: Marina Gabriela Sadith Perez Paredes

Data da Defesa: 29 de julho de 2013

Título da Tese: "Frenagem Regenerativa em Veículo Elétrico Acionado por Motor de Indução: Estudo, Simulação e Verificação Experimental"

Prof. Dr. José Antenor Pomílio (Presidente): Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Junior: Prof. Dr. Gilmar Barreto:

"A imaginação é mais importante que o conhecimento". Albert Einstein

> "A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez". George Bernard Shaw

"Não há sucesso sem grandes privações". Sófocles

Dedico este trabalho a Deus, à minha mãe Sadith, ao meu pai Marino e aos meus irmãos, e ao Miguel pelo amor, carinho e compreensão em todo momento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por estar sempre ao meu lado, de alguma maneira, nos momentos de desânimo e de realizações.

Ao meu orientador, Professor Antenor, pela orientação, pelas sugestões, pela paciência, críticas e confiança em meu potencial. Pelo excelente exemplo de pesquisador.

Aos Professores do laboratório LAFER: Auteliano, Niederauer que com as suas criticas, comentários e correções tornaram possível mais esta conquista no processo de aprendizagem.

Ao pessoal técnico do LAFER: Rosangela e Oswaldo, pela amizade, pelas sugestões, pelo suporte e agilidade na aquisição dos equipamentos.

Aos colegas de laboratório, Tiago Curi, Wellington Avelino, Fellipe Garcia, Juliana Lopes, Diego Rodrigues, Joel Guerreiro, Jakson Bonaldo, Marcos Balduino e Filipe Braga, pelo excelente convivência e pelas trocas de conhecimentos.

Aos meus queridos irmãos, Esther, Elizabeth, Leonardo, Napoleón e Jefferson, pela amizade, incentivo em todo momento.

Aos meus amigos: Ana, André, Angela, Betty, Carla, Cleudiane, Dalia, Diana, Daniel, Edgar, Elias, Fernanda, Gladys, Gina, Hugo, Irene, Jorge, José Luis, Cristina, Marlene, Marisol, Miguel, Segundo, Tiago e Yanet, que me tornam uma pessoa abençoada, porque "as amizades multiplicam as alegrias e dividem os sofrimentos" – Henry Bohn.

A todos os professores e mestres, a quem tive a honra de ser aluna, porque sem eles jamais teria chegado até aqui.

À UNICAMP e à CAPES pela oportunidade e pelo suporte financeiro. A todo o povo do Brasil, que contribui para o crescimento do país e financia trabalhos como este.

Agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

Marina Gabriela Sadith Pérez Paredes

ix

Resumo

Esta dissertação estuda a aplicação de frenagem regenerativa em veículos elétricos, em ação conjunta com freio de atrito. Considera-se o caso de um veículo leve com um motor de indução acionado por inversor. O processo de regeneração ocorre sempre que a velocidade comandada pelo inversor for menor do que a velocidade mecânica. O fluxo reverso de energia é absorvido pela fonte presente no lado CC do inversor. A partir de um único comando de frenagem o sistema é capaz de utilizar os freios elétrico e mecânico de acordo com o melhor procedimento para a recuperação da energia cinética do veículo, respeitando as limitações dos dispositivos eletrônicos e garantindo a frenagem, de acordo com a desaceleração determinada pelo condutor do veículo. Resultados de simulação computacional e em um arranjo experimental permitem analisar e verificar a sistemática proposta.

Palavras-chave: Veículo elétrico, Frenagem regenerativa, Supercapacitor.

Abstract

This thesis studies the application of regenerative braking in electric vehicles in joint action with friction brake. It is considered the case of a light vehicle with an induction motor driven by an inverter. The regeneration process occurs whenever the commanded speed to the inverter is less than the mechanical speed. The reverse flow of energy was able to be absorbed by the source available on the inverter DC side. From a single braking command, the system was able to use the electrical and mechanical brakes according to the best procedure for recovering the vehicle's kinetic energy, respecting the limitations of electronic devices and ensuring the braking according to the deceleration determined by the vehicle driver. Results of computer simulation and in an experimental setup allows to analyze and validate the methodology.

Keywords: Electric vehicle, Regenerative braking, Supercapacitor

Lista de Figuras

Figura 2. 1 Estratégia de controle de um VE protótipo "LF620" [8]	6
Figura 2.2 Diferenças dos veículos elétricos VEH e VEB [14]	10
Figura 2.3 Diagrama de blocos do Sistema de Propulsão Elétrica	11
Figura 2.4 Fluxo de Potência no Gerador de indução	15
Figura 2.5 Característica torque-velocidade da máquina de indução	16
Figura 2.6 Fluxo de potência no veículo na etapa da FR	17
Figura 2.7 Supercapacitores ou EDLC	19
Figura 2.8 Supercapacitores Maxwell [24]	19
Figura 2.9 Diagrama das etapas do inversor	21
Figura 2.10 Fluxo de Energia na Frenagem do Veículo	22
Figura 2.11 Força e Torque na frenagem	24
Figura 2.2 Planejamento Operacional	25
Figura 3.1 Sistema de Freio no Laboratório Ferroviário (LAFER)	28
Figura 3.2 Sistema de Freio com Banco de SC	29
Figura 3.3 Etapas do modelo da frenagem regenerativa do VE	31
Figura 3.4 Geração da referência para a velocidade no inversor	31
Figura 3.5 Etapas do modelo no uso Combinado de Frenagem e Freio Mecânico	33
Figura 3.6 Diagrama de Fluxo da Estratégia 1	34
Figura 3.7 Diagrama de Fluxo da Estratégia 2	35
Figura 3.8 Simulações sem freio mecânico (a) Rotação (RPM) (b) Torque (N.m)	
Figura 3.9 Variáveis elétricas durante o ciclo de condução: (a) Potência Regenerad	da (W) e
(b) Variação da energia no banco de SC (J)	37
Figura 3.10 Simulações com freio elétrico e mecânico: (a) Rotações (RPM), (b) Te	orque de
frenagem elétrica (N.m) e (c) Torque mecânico no eixo do motor (N.m)	

Figura 3.9 Variáveis elétricas durante o ciclo de condução: (a) Tensão no Banco de SC(V	/)
, (b) Corrente na entrada do Banco de SC (A), (c) Potência Regenerada (W) e (d) Variaçã	io
da energia no banco de SC (J)4	0
Figura 3.10 Simulações com freio elétrico e mecânico: (a) Rotação de (RPM), (b) Torqu	ıe
de frenagem elétrica (N.m) e (c) Torque mecânico(N.m)4	1
Figura 3.113 Variáveis elétricas durante o ciclo de condução em baixas velocidades: (a	a)
Tensão no Banco de SC(V), (b) Corrente na entrada do Banco de SC (A), (c) Potênc	ia
Regenerada (W) e (d) Energia Fornecida e Recuperada do Banco de SC4	2
Figura 3.124 Simulações: (a) Rotação de Referência(RPM), (b) Rotação no Motor(RPM	1) 4
Figura 3.135 Simulações de uso combinado de frenagem e freio mecânico: (a) Torque c	le
frenagem elétrica (N.m) (b) Torque mecânico(N.m) e (c) Corrente de estator da Fase a (A	٩)
4	-5
Figura 3.14 Variáveis elétricas durante o ciclo de condução: (a) Tensão no Banco o	le
SC(V), (b) Corrente na entrada do Banco de SC (A), (c) Potência Regenerada (W) e (d	d)
Energia Fornecida e Recuperada do Banco de SC4	6
Figura 4.1 Elementos do Sistema de Freio de Atrito5	50
Figura 4.2 Banco de Supercapacitores5	60
Figura 4.3 Quadro Elétrico do inversor5	51
Figura 4.4 Sistema de acondicionamento dos sinais dos sensores5	51
Figura 4.5 Diagrama de Blocos da Bancada Experimental5	52
Figura 4.6 Calibração da válvula proporcional5	;3
Figura 4.7 Tempo Rampas de redução de frequência5	54
Figura 4.9 Tempos da rampa de desaceleração do inversor com relação à força Normal (N	√) 55
Figura 4.10 Tensão aplicada na válvula proporcional no sistema de Freio	6
Figura 4.11 Variação de velocidade com frenagem elétrica para Td=10 s e Td=12 s5	6
Figura 4.12 Potência elétrica na fonte com frenagem elétrica para Td=10 s e Td=12 s5	;7
Figura 4.13 Frenagem combinada elétrica (até 150 rpm) e mecânica5	;7
Figura 4.14 Resultados da Frenagem Elétrica5	58

Figura 4.15 Potência no banco de SC	.59
Figura 4.16 Resultados de Freio de Atrito	.60
Figura 4.17 Resultados da Frenagem Combinada	.61
Figura 4.18 Potência no Banco de SC	.62
Figura 4.19 Resultados da Frenagem Combinada com rampa variável	.63
Figura 4.20 Potência no banco de SC	.63
Figura 4.21 Resultados da frenagem combinada com freio mecânico com rampa variável	.64
Figura 4.22 Resultados da frenagem combinada com freio mecânico	.65
(a) com Vp=30%*Vpi, (b) com Vp=45%* Vpi e (c) com Vp=47,5%* Vpi	.65
Figura 4.23 Resultados da Frenagem Combinada com Freio Mecânico	.66

Lista de Tabelas

Tabela I: Parâmetros da máquina de indução para a simulação	.30
Tabela II: Variáveis Elétricas em 1000 RPM	.37
Tabela III: Variáveis Elétricas em 1000 RPM	.38
Tabela IV: Variáveis Elétricas em 800 RPM	.43
Tabela V: Variáveis Elétricas da Estratégia 2	.46
Tabela VI: Parâmetros da roda e freio	.53
Tabela VII: Variáveis Elétricas da Frenagem Elétrica	.59
Tabela VIII: Variáveis Elétricas da Frenagem Combinada	.61
Tabela IX: Variáveis Elétricas da Frenagem Combinada	.62
Tabela X: Variáveis Elétricas do Freio Compartilhado	.66

Lista de Abreviaturas

ABS	Anti-lock Braking System
ABVE	Associação Brasileira de Veículos Elétricos
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alterna
FEM	Faculdade de Engenharia Mecânica
F _N	Força Normal
FR	Frenagem Regenerativa
LAFER	Laboratório Ferroviário
MCI	Motor de Combustão Interna
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MI	Máquina de Indução
PWM	Pulse-Width Modulation
SC	Supercapacitor
SIBRATEC	Sistema Brasileiro de Tecnologia
Td	Tempo da rampa de redução de frequência
Vp	Válvula Proporcional
VE	Veículos Elétricos
VEB	Veículo Elétrico a Bateria
VEH	Veículo Elétrico Híbrido

Sumário

1. Intro	dução	1
1.1	Motivação para o estudo	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Estrutura da Tese	4
2. Estu	do da Frenagem de Veículos Elétricos	5
2.1	Veículos Elétricos	7
2.	1.1 Classificação de VEs	8
2.	1.2 Sistema de propulsão elétrica	10
2.2	Máquina de Indução em VEs	12
2.3	Sistemas de Armazenamento de Energia	16
2.	3.1 Baterias	17
2.	3.2 Supercapacitores	
2.4	Controladores Eletrônicos de um VE	20
2.	4.1 Controlador do Freio	20
2.	4.2 Controlador de Tração	20
2.5	Estudo da Dinâmica do Veículo	22
2.6	Processos para Planejamento Operacional	25
3. Mod	elagem Computacional	27
3.1	Descrição dos elementos simulados	27
3.2	Modelo de VE para estudo de frenagem	30
3.3	Estratégias de Controle	
3.	3.1 Estudo da Estratégia 1:	
3.	3.2 Estudo da Estratégia 2:	34
3.4	Resultados das Simulações com Frenagem Elétrica	35
3.5 I	Resultados das Simulações com Uso Combinado de Frenagem	
3.	5.1. Simulações para 1000 RPM	
3.	5.2. Simulações para Rotação de 800 RPM	40

3.6 Resultados das Simulações com Uso Combinado de Frenagem e Freio M	lecânico43
3.6.1. Simulações controlando o Torque	43
3.7 Conclusões do Capítulo	47
4. Resultados Experimentais	49
4.1 Descrição e Estudo da Bancada	49
4.1.1 Estudo do Sistema de Freio Mecânico	52
4.2 Resultados do Estudo Experimental	58
4.2.1 Estudo 1: Frenagem Elétrica	58
4.2.2 Estudo 2: Freio de atrito	59
4.2.3 Estudo 3: Frenagem combinada	60
4.2.4 Estudo 4: Frenagem Combinada com Freio Mecânico	64
4.3 Conclusões do Capítulo	67
5. Conclusões e perspectivas	69
5.1. Conclusão Geral	69
5.2. Perspectiva de trabalhos futuros	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
Apêndice I – Divulgação da Pesquisa	75
Apêndice II – Potência e Energia	77
Apêndice III – Transmissão de Movimento	79
Apêndice IV –Esquemáticos	81
Apêndice V – Programa da Bancada Experimental	

Capítulo 1

Introdução

Nestes últimos anos os veículos elétricos (VE) voltaram a receber maior atenção por permitirem um melhor uso dos recursos energéticos do que os veículos a combustão interna e, consequentemente, serem ambientalmente menos danosos.

Governos, universidades e empresas mundialmente buscam o desenvolvimento dos veículos elétricos tanto para uso industrial e quanto para transporte urbano.

No Brasil há pesquisas para resolver problemas como a baixa autonomia, a conversão de energia, o controle do veículo, o gerenciamento e distribuição da energia, assim como o projeto, tanto estético quanto mecânico e econômico. Portanto, surgem atualmente incentivos à área, com programas que focalizam a pesquisa, o desenvolvimento e a inovação tecnológica aplicada ao transporte eletrificado, especialmente em veículos, como a rede SIBRATEC/ MCTI [1].

O processo da frenagem regenerativa (FR) é aplicado em veículos elétricos que porque permite que se recupere a energia cinética disponível na desaceleração do veículo, levando a energia regenerada para elementos de armazenamento para ser reutilizada. Ademais, um processo de desaceleração deve ser plenamente controlado, permitindo ao condutor determinar a desaceleração desejada, sendo-lhe transparente se o processo de frenagem ocorre de forma regenerativa ou dissipativa.

Neste trabalho de mestrado descreve um processo da frenagem regenerativa baseado em estudos, inicialmente em simulação computacional e, posteriormente, em uma implementação em um sistema que emula o comportamento de um VE disponível no LAFER/FEM.

1.1 Motivação para o estudo

A motivação para o desenvolvimento desta pesquisa são os problemas associados aos veículos elétricos pela relativamente baixa autonomia quando alimentado apenas por baterias.

O uso de frenagem regenerativa tem como objetivos a recuperação da energia cinética e a minimização do desgaste dos freios mecânicos. Em um veículo elétrico, a redução da velocidade normalmente faz a máquina elétrica passar a operar como gerador, havendo um retorno de energia para as fontes, a depender da topologia e do comando aplicado ao conversor eletrônico de potência.

A energia elétrica gerada com a frenagem do veículo pode ser armazenada em baterias (processo químico) e em supercapacitores (eletrostático). Esses últimos têm a capacidade de suprir os picos de potência necessários para a aceleração e também podem ser carregados rapidamente [2].

A frenagem regenerativa é um importante fator para aumento de eficiência dos veículos elétricos, especialmente em trajetos urbanos, em que a quantidade de procedimentos de aceleração e de frenagem é muito grande, o que demanda picos de potência das fontes de alimentação.

1.2 Objetivos

O trabalho tem como objetivo de desenvolver estratégias de recuperação de energia que atuem concomitantemente com o procedimento de frenagem mecânica, de modo a garantir ao condutor o controle desse processo, enquanto se permite recuperar o máximo de energia.

Considera-se o uso de um motor de indução, utilizado comumente nos veículos elétricos, acionado por inversor tipo fonte de tensão, analisando o comportamento do sistema na desaceleração através de simulações em MatLab/Simulink © considerando um VE de pequeno porte, de uso urbano.

Verifica-se o funcionamento da estratégia definida por meio de simulação e em um arranjo experimental disponível no LAFER/FEM.

Os seguintes objetivos específicos, são definidos:

Desenvolver uma modelagem dinâmica do sistema compreendendo o acionamento elétrico, o motor de indução, os acumuladores de energia e um modelo simplificado (inercial) do VE.

Definir uma estratégia para o controle do veículo e de seu motor na frenagem regenerativa, controlando o torque efetivo, nas quais se monitoram e se controlam variáveis mecânicas e elétricas do sistema. Verificação por simulação em *MatLab/Simulink*.

Verificação de limites de uso de frenagem eletromagnética e proposição de uso combinado de frenagem mecânica, seja para aumento da desaceleração, por limitação de capacidade de absorção de energia, ou por variação de torque.

Após a fase de modelagem e simulação, verifica-se a proposta na montagem existente no LAFER que permite o estudo, sob condições controladas, da frenagem de um motor de indução acionando uma carga inercial e com um sistema de freio mecânico.

1.3 Estrutura da Tese

No capítulo 2 faz-se uma revisão bibliográfica analisando-se pesquisas relacionadas ao estudo e controle da frenagem regenerativa aplicada em veículos elétricos e híbridos.

O capítulo 3 aborda os estudos e os resultados focados em uma modelagem computacional de um veículo elétrico simulado em *Matlab/Simulink*.

O capítulo 4 aborda os estudos e resultados experimentais do sistema emulador de um veículo elétrico no LAFER/FEM que contém um sistema integrado controlado e desenvolvido em *LabVIEW*.

O capítulo 5 contém as conclusões gerais e algumas propostas para dar continuidade à pesquisa deste trabalho.

Capítulo 2

Estudo da Frenagem de Veículos Elétricos

A frenagem regenerativa é um processo que permite recuperar a energia cinética e armazená-la em dispositivos baterias ou supercapacitores. Como qualquer processo de eficiência energética, é um procedimento ambientalmente correto [3]. O processo de frenagem regenerativa pode ser implementado em VEs que empregam diversas tecnologias como o uso de supercapacitores, veículos com células de combustível de hidrogênio e veículos com células solares.

A aplicação de FR pode se dar em veículos como motos, karts, veículos de pequeno e médio porte, e veículos de transporte público. São desenvolvidos para contemplar procedimentos otimizados de frenagem, para diversas topologias dos conversores eletrônicos [4,5].

Nos veículos elétricos e híbridos que utilizam supercapacitores e baterias para o sistema de fornecimento e armazenamento de energia na frenagem regenerativa, são alimentados mediante conversores bidirecionais, normalmente em uma configuração abaixadora-elevadora de tensão (*buck-boost*), podendo conter múltiplas entradas, permitindo o controle do o fluxo de energia na tração e frenagens, entre a máquina elétrica e elementos de armazenamento [6].

As referências [4,6] mostram estratégias de controle de veículos elétricos com motores de imã permanente, em que se controla o torque do motor e o torque mecânico nas rodas. O uso desse tipo de motor ainda não é tão difundido. A maioria dos veículos híbridos faz uso de motor de indução, por terem um desempenho aceitável e, principalmente, por seu baixo custo e robustez.

Em [7] apresenta-se uma estratégia para obter uma ótima frenagem regenerativa em motocicleta, ou seja, um veículo com massa reduzida. No caso, a acionamento é feito por motor CC sem escovas com imã permanente.

O artigo [8] apresenta uma estratégia de frenagem regenerativa baseada na lógica nebulosa. A estratégia busca assegurar a estabilidade do veículo nas operações de frenagem, a distribuição da força de desaceleração entre as rodas traseiras, impedindo o bloqueio e deslizamento das rodas nas frenagens. O esquema do veículo elétrico é mostrado na Figura 2.1.



VCU-Unidade de Controle do Veículo BMS-Sistema de Monitoramento das Baterias UCT-Unidade de Controle de Transmissão MCU-Módulo de Controle do Motor CCU-Unidade de Controle de Embreagem VP-Válvula Proporcional

Figura 2. 1 Estratégia de controle de um VE protótipo "LF620" [8]

2.1 Veículos Elétricos

Considera-se neste trabalho que veículos elétricos (VE) são aqueles acionados pelo menos por um motor elétrico. Veículos elétricos existem desde o final do século XIX, quando chegaram a ser fabricados em maior quantidade que veículos com motor a vapor que eram muito ruidosos e desconfortáveis, muito diferentes dos VEs.

Naquela época surgiu um importante avanço técnico com a invenção do freio regenerativo, desenvolvido por M.A. Darracq. O método permitia recuperar a energia cinética do veículo durante a frenagem e recarregar as baterias, oaumentando a autonomia [9].

Embora fossem mais eficientes que os veículos a vapor ou a combustão interna, essa vantagem tinha pouco valor na época, quando o preço do petróleo era muito baixo. Surgiram críticas em que o VE de baterias era considerado muito caro, além de volumoso e pesado, pelo uso de baterias, necessitando de longo tempo de recarga e ter uma baixa autonomia.

Apenas recentemente, com a crescente importância dada a aspectos ambientais, é que interesses de usuários e de fabricantes voltaram a valorizar os VEs.

No final do século XX surgiram modelos híbridos, com uso associado de motor a combustão interno (MCI) e motor elétrico, abrindo novas perspectivas para os VEs de transporte privado. O amadurecimento de algumas tecnologias, especialmente nos acumuladores de energia e nos sistemas de tração elétrica foram determinantes para esse novo cenário. A produção e o uso de VEs, principalmente no contexto urbano, têm crescido de forma generalizada, com todos os fabricantes de veículos desenvolvendo seus modelos em consórcio com centros de pesquisa e universidades, com o objetivo de agregar aspectos de vanguarda tecnológica [10,11].

Atualmente surgem novas tecnologias em motores elétricos, elementos de armazenamento, elementos mecânicos, sistemas de supervisão e controle, que formam parte do veículo elétrico.

No ano 2012 realizou-se no Brasil o 8° Salão Latino-Americano de Veículos Elétricos e Componentes, reunindo fabricantes, fornecedores e demais empresas do setor automobilístico e elétrico no país, apresentando os veículos que estão em circulação no mercado externo e que estarão à venda no mercado interno nos próximos anos. Alguns dos veículos exibidos foram o **Palio Weekend Elétrico**, um projeto da Fiat em parceria com a Itaipu Binacional (2009), usado como um carro de imagem da marca, para mostrar sua capacidade tecnológica. O **Nissan Leaf** é o primeiro totalmente elétrico a entrar em produção em 2010, atingindo números de vendas que superam 32 mil unidades em todo o mundo. O **Fluence Z.E**. é uma versão elétrica do sedã médio do Renault. O **Mitsubishi i-MiEV**, feito em parceria com a PSA Peugeot Citroën, que é vendido na Europa, Ásia e América do Norte. O **Toyota Prius** é o híbrido mais vendido do mundo, atualmente na sua terceira geração, que deve estar à venda brevemente no mercado interno.

De acordo com a Associação Brasileira de Veículos Elétricos (ABVE) o mercado ainda é incipiente, mas a expectativa é que surjam legislações incentivando os veículos elétricos. Três etapas na implantação dos modelos movidos à eletricidade estão previstas. A primeira é haver incentivo para importar VEs. Depois, a importação de peças com montagem no país. Por último, criar fábricas no Brasil, quando o mercado estiver desenvolvido [12].

2.1.1 Classificação de VEs

Os VEs podem ser classificados em cinco famílias pelo tipo de energia que é disponibilizada a bordo [13]:

VE a bateria - VEB - a energia é fornecida por um conjunto de baterias que são recarregadas na rede elétrica. Muitos modelos de VEB, competitivos para determinados nichos de mercado, estão disponíveis em diversos países e são fabricados tanto por indústrias tradicionais como novas.

VE híbrido - VEH - a energia é fornecida por um gerador a bordo que é acionado por um motor de combustão interna (MCI). Estes veículos também usam sistemas de bateria e capacitores para acumular energia elétrica, permitindo que o MCI só opere nas condições ótimas ou fique desligado. Destacam-se dois tipos básicos de VEH: o VEH "serial" em que as rodas são acionadas apenas pelo(s) motor(es) elétrico(s) e o VEH "paralelo" em que as rodas podem ser acionadas pelo MCI em paralelo com o motor elétrico.

VE de célula a combustível – VECC - é suprido por células a combustível, equipamento eletro-químico que transforma a energia do hidrogênio diretamente em eletricidade. Esta tecnologia é objeto de muita pesquisa na atualidade e diversos fabricantes apostam nela como o futuro dos veículos. O hidrogênio será distribuído diretamente ou produzido a partir do metano (Gás Natural), metanol ou etanol. O VECC também usa a bordo sistemas de acumulação de energia, sejam baterias ou capacitores.

VE ligado à rede ou trólebus - a energia é fornecida pela rede elétrica. Trata-se do tipo mais presente no Brasil (estado de São Paulo). Entretanto, devido ao alto custo da rede e dificuldades de trânsito, não há previsão de expansão.

VE Solar - VES - a energia é fornecida por placas fotovoltáicas(FV). Restrito ao ambiente das universidades que trabalham com as FV, é pouco provável que o VES venha a se transformar em um veículo de uso prático pelas restrições de tamanho dos veículos que limitam a dimensão dos painéis e, consequentemente, sua potência.

Atualmente o VEH tem uma aceitação maior no mercado do que os VEB. Na Figura 2.1 mostra um diferencial entre alguns dos fatores como a velocidade máxima, tempo de recarrega das baterias e a autonomia.





Figura 2.2 Diferenças dos veículos elétricos VEH e VEB [14]

A iniciativa de intensificar o uso de veículos elétricos continua sendo tendência mundial, irreversível, que combinam os benefícios da alta eficiência energética, baixo nível de ruído e de emissões e custos operacionais muito competitivos.

2.1.2 Sistema de propulsão elétrica

O sistema de propulsão elétrica permite impelir ou dar funcionamento aos veículos elétricos e veículos elétricos híbridos. A Figura 2.3 apresenta o diagrama de blocos do sistema que consiste de máquinas elétricas, conversores de energia, armazenadores de energia e controladores eletrônicos.

Cada bloco tem funcionalidades que serão descritas a seguir:

A máquina elétrica converte a energia elétrica em energia mecânica para dar propulsão ao veículo ou, vice-versa, para permitir frenagem regenerativa e gerar eletricidade que será enviada para os elementos de armazenamento de energia a bordo.

O conversor de energia é usado para fornecer à máquina elétrica tensão e corrente em condições adequadas.

O controlador eletrônico comanda o conversor de energia de modo a controlar a operação da máquina elétrica para a produção de torque e velocidade adequada, de acordo com o comando recebido. O controlador eletrônico pode ser dividido em unidades funcionais: sensores, circuitos de interface e processador.



Figura 2.3 Diagrama de blocos do Sistema de Propulsão Elétrica

Sensores são utilizados para traduzir as quantidades mensuráveis como corrente, temperatura, tensão, velocidade, torque e fluxo em sinais elétricos, os quais são enviados aos circuitos de interface. Estes sinais são condicionados a um nível apropriado, antes de serem lidos no processador digital. Os sinais de saída do processador digital são geralmente condicionados através do circuito de interface para comandar os dispositivos semicondutores de potência do conversor de energia.

A escolha de sistemas de propulsão elétrica para VEs e VEHs depende de uma série de fatores, incluindo a expectativa do motorista, restrições de veículos e fonte de energia.

A expectativa do motorista é definida por um perfil de condução, que inclui a aceleração, velocidade máxima, capacidade nas subidas, frenagem e alcance.

Restrições de veículos, incluindo volume e peso, dependem do tipo e massa do veículo e a carga transportável.

A fonte de energia refere-se a baterias, células de combustível, supercapacitores, volantes de inércia e fontes híbridas.

O projeto de um VE ou VEH deve ser feito sob um enfoque sistêmico, considerando todos os fatores de utilização e as possíveis soluções tecnológicas disponíveis [14].

2.2 Máquina de Indução em VEs

Máquinas de corrente alternada, do tipo indução, especialmente com rotor em gaiola, são dispositivos muito robustos, não exigem manutenção elétrica e apresentam excelente relação peso/potência em relação a outros tipos de máquinas [15,16].

Sua velocidade depende, essencialmente, da frequência da alimentação CA aplicada aos enrolamentos do estator. Dessa forma, para a variação de velocidade exigida em aplicações veiculares, é necessário o uso de uma fonte de frequência variável.

Isso se torna possível com os conversores eletrônicos de potência, desenvolvidos a partir da década de 1970, com os transistores de potência, o que permitiu a realização de conversores CC-CA com custo e confiabilidade adequados.

Os motores utilizados nos VEs e VEHs geralmente exigem partidas e paradas frequentes, altas taxas de aceleração/desaceleração, alto torque nas partidas, alta velocidade de cruzeiro, e uma gama muito ampla de velocidades de operação.

A máquina de indução é reversível, podendo atuar como motor ou como gerador. O uso como gerador depende da capacidade da fonte absorver a energia que retorna. No caso de um VE, a possibilidade da geração de energia se dá nas reduções de velocidade e nas aplicações de freio [15].

Dadas a característica trifásica da alimentação do estator e a distribuição espacial dos enrolamentos, o campo produzido pelo estator é girante, ou seja, sua resultante possui um movimento rotacional.
O campo produzido pelas correntes induzidas no rotor terá a mesma característica, procurando sempre acompanhar o campo girante do estator. A velocidade angular do campo girante depende da frequência de alimentação e do número de polos da máquina [16].

Sendo p o número de polos e ω a frequência angular (em rd/s) das tensões de alimentação da máquina, a velocidade de rotação do campo girante, chamada de velocidade síncrona ω_s , é dada por:

$$\omega_s = \frac{2.\omega_m}{p} \tag{2.2.1}$$

O escorregamento é definido [19]:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \tag{2.2.2}$$

 ω_m = velocidade angular no rotor [rd/s]

 ω_s = velocidade angular no estator [rd/s]

Pela análise de fluxo de potência e torque se define:

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_m} = \frac{(1-s)P_g}{\omega_m}$$
(2.2.3)

Onde:

 T_{em} = torque eletromagnético [N.m]

 P_{em} = potência desenvolvida pelo motor [W]

 P_g = potência presente no entreferro da máquina [W].

Para o fluxo de potências da máquina de indução operando no modo gerador, considerou-se [16, 17]:

$$P_s = P_{em} + P_{J,s} + P_{J,r}$$
(2.2.4)

$$P_{J,r} = sP_g \tag{2.2.5}$$

$$s < 0 \qquad \begin{cases} P_{s} < 0 \\ P_{J,s}, P_{J,r} \ e \ P_{rot} > 0 \\ P_{g} \ e \ P_{em} < 0 \\ P_{eixo} > 0 \end{cases}$$

Onde:

 $P_{J,r}$ = potência das perdas do enrolamento do rotor [W] $P_{J,s}$ = potência das perdas do enrolamento do estator [W] P_{rot} = potência das perdas rotacionais [W] P_s = potência de entrada do estator [W].



Figura 2.4 Fluxo de Potência no Gerador de indução

A Figura 2.5 mostra uma curva torque - velocidade típica para um motor alimentado a partir de uma fonte de tensão senoidal de frequência e amplitude fixas, de acordo com a análise de seu fluxo de potência. Existem três regiões de operação [18]:

- tração (0<s<1)
- regeneração (s<0)
- frenagem (1<s<2)



Figura 2.5 Característica torque-velocidade da máquina de indução

Na região de regeneração a frenagem permite a um veículo recapturar (e armazenar) parte da energia cinética que seria convertida em calor (nas lonas ou discos nas rodas) durante a frenagem por atrito no veículo convencional.

Atuando a frenagem regenerativa, quando o motorista aciona o freio para reduzir a velocidade do veículo elétrico, a máquina elétrica passa a atuar como gerador, acionado pela roda ou eixo da roda. A energia elétrica gerada com a frenagem do veículo é absorvida, podendo ser enviada a supercapacitores ou banco de baterias.

2.3 Sistemas de Armazenamento de Energia

O sistema de armazenamento de energia é formado por dispositivos que acumulam energia (normalmente de forma química ou eletrostática) e entregam energia às cargas.

O sistema de energia para um VE pode ser uma combinação de baterias e supercapacitores, atendendo a requisitos de alta potência especifica e energia especifica, garantindo um desempenho adequado tanto na tração quanto na frenagem.

Durante a frenagem regenerativa, a máquina funciona no modo gerador, proporcionando à energia ser recuperada para os SC, que suportam picos de potência que as baterias não conseguem absorver.

Na Figura 2.6 apresenta-se uma estrutura que pode ser empregada caso os SC estejam em um barramento diferente do barramento CC que alimenta o inversor [19,20].



Figura 2.6 Fluxo de potência no veículo na etapa da FR

2.3.1 Baterias

Baterias são dispositivos eletroquímicos que convertem energia elétrica em energia química potencial durante a carga, e convertem a energia química em energia elétrica durante a descarga.

A função de uma célula típica de bateria eletroquímica é baseada numa reação química simples. Quando dois metais diferentes são imersos numa solução ácida, uma reação química produz uma tensão. Usando esta reação, uma bateria pode ser descarregada e carregada muitas vezes.

Os tipos baterias utilizadas em VEs são [21]:

- Íons de Lítio
- Polímero de Lítio
- Lítio de fosfato de ferro
- Níquel-hidreto metálico

Algumas importantes propriedades de baterias são:

• Densidade de energia: a quantidade de energia armazenada em um kg de bateria (Wh/kg)

• Densidade de potência: a quantidade de potência que a bateria pode entregar por unidade de massa (W/kg).

• Energia específica: a quantidade de energia que pode ser armazenada em uma unidade de volume da bateria (Wh/m³)

• Potência específica: a quantidade de potência que a bateria pode fornecer por unidade de volume (W/m3)

Um banco de baterias é feito com múltiplas células em série, sendo um problema equilibrar a tensão de todas as células individuais. Os VEs incluem internamente um sistema de monitoramento das Baterias (BMS) para que o processo de recarga das baterias ocorra adequadamente em todas as unidades [22].

2.3.2 Supercapacitores

Os supercapacitores ou Capacitores eletroquímicos de dupla camada (EDLC) são elementos que armazenam energia elétrica de forma separada, especificamente como um campo elétrico de dupla camada criado entre os eletrodos com um material poroso como o carvão ativado como é mostrado na Figura 2.6. Devido à sua baixa resistência série equivalente e alta densidade de potência são os componentes ideais para serem colocado em paralelo com um conjunto de baterias de modo a fornecer os picos de potência permitindo reduzir a capacidade das baterias.

Os supercapacitores se caracterizam pela capacidade de suprir elevados picos de potência, o que vale dizer, de suportar elevadas correntes. Por outro lado, a energia acumulável é baixa, em comparação com as baterias. O uso consorciado de ambas fontes apresenta-se, do ponto de vista do desempenho de um VE, como interessante, senão necessário [22, 23].



Figura 2.7 Supercapacitores ou EDLC

Embora os supercapacitores possuam capacidade de armazenamento de energia muito menor do que as baterias (menor densidade de energia), em situações de percursos reduzidos, com possibilidade de recarga nas paradas, é uma alternativa ao emprego de baterias.

Uma aplicação em estudo dos supercapacitores é sua utilização em ônibus elétricos utilizados em transporte público.



Figura 2.8 Supercapacitores Maxwell [24]

2.4 Controladores Eletrônicos de um VE

São diversas as funções de um veículo que devem ser automaticamente reguladas. Isso é válido tanto para veículos a combustão interna quando VEs.

O usuário comanda apenas funções básicas, como acelerar ou frear, ou ainda a direção a seguir. O efetivo comando dos diversos componentes do sistema de tração e de navegação é providenciado por processadores digitais, cuja atuação é, em geral, transparente ao usuário.

2.4.1 Controlador do Freio

O sistema de freio ABS é um sistema eletrônico que utiliza sensores, monitora a rotação de cada roda e a compara com a velocidade do carro. Em situações de frenagem cotidianas, o sistema ABS não é ativado. Quando a velocidade da roda cai muito em relação à do carro, ou seja, na iminência do travamento, o sistema envia sinais para válvulas e bombas no sistema de óleo do freio, aliviando a pressão. Essa operação causa uma vibração quando se "pisa fundo" no pedal do freio, o que deve ser considerado pelo motorista como operação normal do sistema. Assim, evita-se o descontrole do veículo (permitindo que obstáculos sejam desviados enquanto se freia) e aproveita-se mais o atrito estático, que é maior que o atrito cinético (de deslizamento).

2.4.2 Controlador de Tração

O comando do acionamento do motor utiliza um microprocessador que produz os sinais de acionamento do inversor que alimenta a máquina.

Tipicamente a máquina de indução é acionada por um inversor de frequência e tensão variáveis, com modulação PWM. O processo de obtenção da tensão e frequência desejadas depende da disponibilidade de uma fonte CC. No caso de um VE, isso é provido pelas baterias/SC [26,27].



Figura 2.9 Diagrama das etapas do inversor

Basicamente existem dois tipos de controle nos inversores eletrônicos: o escalar e o vetorial.

O controle escalar baseia-se no conceito original do inversor de frequência: impõe no motor uma determinada combinação de tensão e frequência, visando manter a relação V/f constante, ou seja, o motor trabalha com fluxo aproximadamente constante. É normalmente aplicado quando não há necessidade de respostas rápidas a comandos de torque e velocidade.

O controle escalar é o mais utilizado devido à sua simplicidade e devido ao fato de a maioria das aplicações não requerer alta precisão e/ou rapidez no controle da velocidade.

O controle vetorial possibilita atingir um maior grau de precisão e rapidez no controle do torque e da velocidade do motor. O controle decompõe a corrente do motor em dois vetores: um que produz o fluxo magnetizante e outro que produz torque, regulando separadamente o torque e o fluxo. As principais diferenças são explicadas com maior detalhe nas referências [18, 19]. Os veículos elétricos dependem fortemente dos sistemas de controle para o acionamento do motor de indução trifásico. Os motores de indução dos veículos mais comumente usam controle vetorial, pois requerem alta precisão e rapidez no controle da velocidade.

2.5 Estudo da Dinâmica do Veículo

A frenagem de um veículo é uma das mais importantes características que afetam a segurança do veículo. Em condução urbana, uma significativa quantidade de energia é consumida na frenagem. Nos últimos anos, os VEs e VEH fazem uso da tecnologia de frenagem regenerativa permitindo recuperar parte da energia para ser acumulada no sistema de armazenamento do VE.

Como se mostra na Figura 2.10, o fluxo de energia para um veículo quando realiza uma frenagem convencional com freio mecânico, a energia cinética é convertida em calor.

O uso de frenagem regenerativa tem como objetivos a recuperação da energia cinética e a minimização do desgaste dos freios mecânicos. Em um veículo elétrico, a redução da velocidade normalmente faz a máquina elétrica passar a operar como gerador, havendo um retorno de energia para as fontes, a depender da topologia e do comando aplicado ao conversor eletrônico de potência. O sistema de frenagem regenerativa não só melhora a eficiência do veículo, mas também potencialmente melhora o desempenho de frenagem.



Figura 2.10 Fluxo de Energia na Frenagem do Veículo

As equações seguintes permitem avaliar a energia acumulada usando o princípio da conservação de energia, a partir do momento de inércia total no eixo do motor.

$$E_{cinética} = m.\frac{V^2}{2} = J.\frac{\omega_m^2}{2}$$
(2.5.3)

$$\frac{J_{M}}{J_{C}} = \frac{\omega_{C}^{2}}{\omega_{M}^{2}} = a^{2}$$
(2.5.4)

$$J_{Total} = J_C + J_M \tag{2.5.5}$$

Onde as grandezas são:

- J_M = inércia do motor (kg.m²),
- J_C = inércia na carga (kg.m²),
- a = relação de engrenagens no redutor,
- m = massa do veículo (Kg),

$$\mathcal{O}_M$$
 = velocidades no motor (rad/s) e

 ω_C = velocidade aplicada nas rodas (m/s).

A Figura 2.11 representa uma roda durante a frenagem. A pastilha de freio é pressionada contra o disco de frenagem, desenvolvendo assim um torque de atrito. A força de frenagem pode ser expressa como:

$$F_f = \frac{T_f}{R} \qquad [N] \tag{2.5.1}$$

A força de frenagem aumenta com um aumento do torque de frenagem. Há uma força de frenagem máxima, limitada pela capacidade de aderência, expressa como:

$$F_{b\max} = \mu * F_N \qquad [N] \qquad (2.5.2)$$



Figura 2.11 Força e Torque na frenagem

- R = Raio do pneu.
- V = Velocidade no veículo (m/s).

 F_N = Força normal,

$$F_f$$
 = Força de freio,

- T_f = Torque de freio,
- m = Massa do veículo,

g = Gravidade,

P = Força Peso,

Atritos se originam, evidentemente, nas áreas de contato entre dois corpos, como na roda e no solo. O coeficiente de aderência μ tem valores de 0,1 a 0,7 a depender do solo [25].

Quando a frenagem é puramente mecânica, a energia retirada da massa em movimento se converte em calor. Já na FR essa energia reflui para os conversores e fontes. No caso de um VE, o motor é normalmente dimensionado para o processo de aceleração e de cruzeiro (operação em velocidade constante).

Durante a frenagem, a máquina elétrica possivelmente operará em sobrecarga. A depender do ciclo de condução, esse é um procedimento aceitável, desde que se assegurem dispositivos de proteção que impeçam uma elevação exagerada de temperatura. Além do motor, tem-se que levar em conta os conversores eletrônicos que processam essa potência. Tipicamente, a capacidade de suportar sobrecarga de um circuito eletrônico é menor do que a de um dispositivo eletromagnético, como o motor. A capacidade de sobrecarga de curto prazo (alguns segundos) dos conversores eletrônicos tem que ser severamente respeitada, sob o risco de destruição dos mesmos.

Caso a desaceleração demandada pelo condutor produza um valor de corrente não suportável pelos conversores, faz-se necessário o uso concomitante do freio mecânico. Há ainda a questão da segurança, caso o sistema elétrico não funcione adequadamente na frenagem.

2.6 Processos para Planejamento Operacional

O planejamento operacional do trabalho é uma formalização dos objetivos e procedimentos a seguir, principalmente através de metodologias de desenvolvimento que permite identificar as atividades por prioridades para realizar a programação de tarefas do conteúdo do trabalho [28].



Figura 2.2 Planejamento Operacional

2.6.1 Simulação

A simulação possibilita, através de estudos do comportamento de um sistema ou de um modelo que o represente de forma simplificada, avaliar os resultados que serão encontrados em situações reais, ampliando a compreensão do comportamento de sistemas ou mesmo avaliar as estratégias frente a fatos dos quais não se consegue vislumbrar os resultados finais ou a totalidade de suas implicações.

2.6.2 Experimentação

A experimentação é uma técnica apropriada para elaborar e construir conhecimento científico. A atividade experimental é necessária para validar os modelos de simulação e para corrigi-los, se necessário.

Capítulo 3

Modelagem Computacional

Para a modelagem e a simulação em Matlab/Simulink © é preciso descrever um sistema que emula um veículo elétrico alimentado por supercapacitores, focalizando os aspectos de frenagem elétrica e mecânica, assim como a ação conjunta de freio elétrico e mecânico. Estuda-se o comportamento da frenagem regenerativa (FR) elétrica, considerando um VE com motor de indução trifásico acionado por inversor de frequência variável.

3.1 Descrição dos elementos simulados

Para a modelagem e a simulação do VE, focalizam-se os aspectos de frenagem elétrica e mecânica. Estuda-se o comportamento da frenagem regenerativa (FR) elétrica, considerando um VE com motor de indução trifásico acionado por inversor de frequência variável. A ação conjunta de freio elétrico e mecânico é proposta como meio de minimizar a ineficácia e pouca controlabilidade da FR em baixas velocidades, garantindo o comportamento esperado para a desaceleração. A modelagem toma como base uma bancada presente no Laboratório Ferroviário (LAFER) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da Unicamp como se apresenta na Figura 3.1. Tal montagem será usada para validar os estudos de simulação, de modo que seus parâmetros são utilizados na modelagem.

São os seguintes os equipamentos presentes no arranjo experimental: Motor (1) Weg de corrente alternada de 60 cv, 4 polos, rotação de regime 1775 rpm, acionado por inversor Weg, modelo CFW-05; Redutor de velocidade (2) com redução nominal de 1:2,5; (3) Dispositivo de medição de torque e (4) Roda ferroviária de 33" usada para simular a inércia da quarta parte do veículo.

Para simular esse sistema considerou-se o momento de inércia total da carga no eixo do motor, incluindo o redutor e a roda, os coeficientes de atrito aplicados na desaceleração e tempos de aceleração e desaceleração [25].



Figura 3.1 Sistema de Freio no Laboratório Ferroviário (LAFER)

A energia é fornecida por um banco de supercapacitores de capacitância total de 17F. A inércia total no eixo no motor é 6,83 kg.m², sendo a energia total calculada mediante a equação (2.5.3), obtendo 118 kJ. Para a simulação da frenagem mecânica se aplicará um torque variável ao freio de atrito.

A Figura 3.2 apresenta a proposta para um sistema de frenagem que integra a frenagem elétrica regenerativa com o freio mecânico. A partir do comando de frenagem, o inversor reduz a frequência da tensão de saída, de modo que o escorregamento da máquina se torne negativo e esta passe a atuar como gerador. A retirada de energia do veículo se relaciona com a redução da energia cinética e, portanto, da velocidade.



Figura 3.2 Sistema de Freio com Banco de SC

A potência necessária para a aceleração de um veículo é menor do que para a frenagem, pela simples razão de que o projeto de veículo pressupõe uma certa variação de velocidade em um dado intervalo de tempo, o que, em primeira aproximação, determina o torque e a máxima potência requerida. O processo de frenagem, por sua vez, pode ser requisitado em um intervalo de tempo muito menor, o que implica em um pico de potência mais elevado.

As simulações são feitas considerando os parâmetros da Tabela I.

Potência Nominal	37 kW
Torque Nominal	200 N.m
Resistência do estator (rs)	$0,025\Omega$
Resistência do rotor (rr)	0,05837 Ω
Indutância do estator (Ls)	0,2 mH
Indutância do rotor (Lr)	0,867 mH
Indutância mútua (Lm)	3,79 mH
Momento de inércia(J)	6,83 kg.m ²
Número de polos (P)	4

Tabela I: Parâmetros da máquina de indução para a simulação

3.2 Modelo de VE para estudo de frenagem

Na Figura 3.3, o bloco A representa a definição da referência de velocidade que será aplicada ao inversor. Ao longo das simulações, a geração de tal referência foi alterada para verificar diferentes estratégias de frenagem. O bloco B se relaciona com a frenagem mecânica. Tem-se uma tabela que relaciona o torque mecânico de frenagem em função da velocidade da roda. No bloco C está representado o comportamento dinâmico do veículo, com medições de torque e de velocidade do motor. Inclui também parâmetros relacionados com o atrito entre o pneu e o solo.

A Figura 3.4 explicita o bloco A da Figura 3.3 e mostra como é feita a definição da referência de frequência a ser enviada ao inversor. VREF é a velocidade desejada no motor, enquanto \mathcal{O}_m é a velocidade medida. O torque necessário para igualar as velocidades é determinado por meio de um compensador PI. A partir desse torque, considerando o momento de inércia do sistema e o torque eletromagnético do motor, se determina a referência a ser efetivamente dada ao inversor [29].



Figura 3.3 Etapas do modelo da frenagem regenerativa do VE

$$T_{ref} = K_i \int (V_{ref} - \omega_m) dt + K_p (V_{ref} - \omega_m)$$
(3.2.1)

$$J \dot{\omega}_{ref_{Inv}} + B \cdot \omega_{ref_{Inv}} = T_{ref_{Inv}} - T_{em} \qquad (3.2.2)$$

 Kp_T é proporcional ao atrito no sistema e Ki_T é inversamente proporcional ao momento de inércia.



Figura 3.4 Geração da referência para a velocidade no inversor

A. Definição das velocidades de ensaio

Os valores das velocidades de ensaio são representativos da aplicação urbana de um veículo leve. Foram analisadas algumas situações com as seguintes velocidades lineares e angulares no eixo das rodas [25]:

Nível 1: 35 km/h ou 323 rpm
Nível 2: 50 km/h ou 461 rpm
Nível 3: 65 km/h ou 600 rpm

Em um veículo de pequeno porte, a desaceleração não ultrapassa 5 m/s². A faixa de desaceleração usual, que é aquela na qual o veículo freia na grande maioria das vezes, apresenta os seguintes níveis, considerados nas simulações [25]:

Nível 1: 1,5 m/s2 ou baixo
Nível 2: 2,5 m/s2 ou médio
Nível 3: 3,5 m/s2 ou alto

O modelo de uso de frenagem compartilhado (freio elétrico e freio mecânico) é apresentado na Figura 3.5.

O bloco A da Figura 3.5, através da chave S1, seleciona a referência de velocidade para o inversor. Durante as fases de aceleração e de cruzeiro, a referência segue a função "Velocidade REF", que produz o sinal "Wref".

Quando se inicia a frenagem, a referência é alterada e passa a ser dada por uma fração da própria velocidade mecânica, "Wm". Isso garante operar com escorregamento negativo, o que fez a máquina de indução operar como gerador.

O bloco B estabelece um torque frenante de referência, "Tref". Além disso, calcula o torque mecânico que deve ser somado ao torque eletromagnético, Tem, para obter "Tref".

O Torque mecânico, Tm, resultante é aplicado no bloco "Inversor/SC", até a parada do veículo.



Figura 3.5 Etapas do modelo no uso Combinado de Frenagem e Freio Mecânico

3.3 Estratégias de Controle

3.3.1 Estudo da Estratégia 1:

A Figura 3.6 apresenta o diagrama do procedimento de frenagem. A partir da desaceleração determinada pelo condutor (acionamento do pedal de freio) é gerado um comando para a redução da frequência do inversor, o que leva o motor a operar como gerador. Caso a potência ou a corrente resultante seja excessiva para os conversores, um torque frenante adicional é proporcionado pelo freio mecânico.

Em baixa velocidade (o que equivale a dizer em baixa frequência de saída do inversor), o torque eletromagnético resultante na máquina elétrica passa a apresentar oscilações, o que prejudica o procedimento de frenagem, além de poder provocar desconforto para o usuário. Por essa razão, em tal condição, a frenagem regenerativa é desabilitada e segue exclusivamente a frenagem mecânica.



Figura 3.6 Diagrama de Fluxo da Estratégia 1

3.3.2 Estudo da Estratégia 2:

A Figura 3.7 apresenta o diagrama do procedimento de frenagem combinada, adicionando um controle de torque mecânico, permitindo atuar o freio mecânico em conjunto com o freio elétrico.

Em baixa velocidade aplica-se exclusivamente a frenagem mecânica, desabilitando a frenagem elétrica.



Figura 3.7 Diagrama de Fluxo da Estratégia 2

3.4 Resultados das Simulações com Frenagem Elétrica

Para observar o comportamento do veículo apenas com frenagem elétrica foi simulado o acionamento do motor com uma rotação de 1000 rpm, resultando uma rotação na roda de 400 rpm, como mostra a Figura 3.8. Na partida do motor (1) há uma oscilação de torque. Após a aceleração há um intervalo de cruzeiro e, em seguida, a frenagem. Em baixas velocidades (2) há uma oscilação no torque devido ao comportamento do motor de indução. O acionamento foi feito apenas com a imposição da tensão e da frequência, sem controle da corrente.



Figura 3.8 Simulações sem freio mecânico (a) Rotação (RPM) (b) Torque (N.m)

Na Figura 3.9 apresenta-se a potência e a energia que fornece o banco de supercapacitores sem uso de estratégias descritas. Observe que em baixas frequências o uso do freio elétrico potência tem-se consumo de energia da fonte e não recuperação.



Figura 3.9 Variáveis elétricas durante o ciclo de condução: (a) Potência Regenerada (W) e(b) Variação da energia no banco de SC (J)

Potência de Pico	18 kW
Corrente de Pico	55 A
Tensão Inicial no SC	320 VCC
Tensão Final no SC	315 VCC
Energia Fornecida	52 kJ
Energia Recuperada	24 kJ

Tabela II: Variáveis Elétricas em 1000 RPM

3.5 Resultados das Simulações com Uso Combinado de Frenagem

As simulações apresentadas fazem uso combinado de freio elétrico e mecânico para baixas velocidades. Fazendo uso da estratégia de comando indicada na Figura 3.6, quando a velocidade atinge um valor baixo, a energia cinética é muito pequena e, do ponto de vista de recuperação de energia, muito pouco há a recuperar. Como se tem, adicionalmente, a oscilação no torque do motor, é conveniente passar a fazer uso somente do freio mecânico.

3.5.1. Simulações para 1000 RPM

A Figura 3.10 mostra uma rotação no eixo do motor e no eixo da roda. Observe a interrupção no torque frenante do motor, o qual é substituído por um torque equivalente proveniente do freio mecânico, de modo a manter a desaceleração desejada até a parada do veículo.

Na Figura 3.11 apresenta-se a tensão, corrente, potência e energia que fornece o banco de supercapacitores. Dadas as perdas do sistema (elétricos, atrito e aerodinâmicas), a energia recuperável é sempre menor do que a consumida. Observe que quando o sistema de freio elétrico é desligado a potência recuperada já é praticamente nula.

A Tabela III quantifica tais grandezas no banco de SC. A tensão no SC desce de 320Vdc a 310Vdc, mas recupera na frenagem aproximadamente 5VCC.

Potência de Pico	18 kW
Corrente de Pico	55 A
Tensão Inicial no SC	320 VCC
Tensão Final no SC	315 VCC
Energia Fornecida	53 kJ
Energia Recuperada	25 kJ

Tabela III: Variáveis Elétricas em 1000 RPM

A diferença entre as energias fornecida e recuperada se deve às perdas aerodinâmicas, de atrito com o solo e nos conversores.



Figura 3.10 Simulações com freio elétrico e mecânico: (a) Rotações (RPM), (b) Torque de frenagem elétrica (N.m) e (c) Torque mecânico no eixo do motor (N.m)



Figura 3.9 Variáveis elétricas durante o ciclo de condução: (a) Tensão no Banco de SC(V)
, (b) Corrente na entrada do Banco de SC (A), (c) Potência Regenerada (W) e (d) Variação da energia no banco de SC (J)

3.5.2. Simulações para Rotação de 800 RPM

Outro conjunto de simulações foi realizado para velocidade de 35 km/h, como mostra a Figura 3.12. Novamente o freio mecânico é chamado a atuar quando a velocidade se reduz, de modo a garantir que o torque frenante solicitado pela referência.

O algoritmo permite calcular o torque necessário para atuar em diversas velocidades e dar continuidade com a desaceleração do veículo.



Figura 3.10 Simulações com freio elétrico e mecânico: (a) Rotação de (RPM), (b) Torque de frenagem elétrica (N.m) e (c) Torque mecânico(N.m)



Na Figura 3.13 apresenta-se o comportamento da tensão, corrente, potência e energia no banco de supercapacitores.

Figura 3.113 Variáveis elétricas durante o ciclo de condução em baixas velocidades: (a)
Tensão no Banco de SC(V), (b) Corrente na entrada do Banco de SC (A), (c) Potência
Regenerada (W) e (d) Energia Fornecida e Recuperada do Banco de SC

A Tabela IV apresenta os resultados numéricos obtidos nesse processo de frenagem a partir de uma baixa velocidade. Nota-se que, proporcionalmente, a recuperação de energia é menor, o que demonstra que em baixas velocidades a eficácia da frenagem regenerativa, do ponto de vista energético, é menos relevante. Resta ainda a vantagem da redução no desgaste do freio mecânico.

Potência de Pico	11kW
Corrente de Pico	38 A
Tensão Inicial	320 VCC
Tensão Final	316 VCC
Energia Fornecida	37 kJ
Energia Recuperada	16 kJ

Tabela IV: Variáveis Elétricas em 800 RPM

3.6 Resultados das Simulações com Uso Combinado de Frenagem e Freio Mecânico

As simulações apresentadas com a utilização das etapas do modelo da Figura 3.5 fazem uso combinado de freio elétrico e mecânico concomitantemente para a desaceleração.

Nas simulações, como não há um controle direto do torque, é preciso algum artificio para garantir que a maquina de indução opere como gerador durante toda a frenagem, dado que a diminuição da velocidade se dá pela ação conjunta dos dois sistemas de freio, a referência de velocidade para o inversor é definida como um valor sempre menor do que a velocidade do motor o que garante escorregamento negativo e operação como gerador.

3.6.1. Simulações controlando o Torque

A Figura 3.13 (a) mostra a velocidade de referência de entrada no inversor, combinando as duas velocidades de referência do bloco A da Figura 3.5, que serão usadas na tração e na desaceleração. No início da desaceleração usa-se o freio elétrico e mecânico simultaneamente até atingir uma baixa velocidade na qual não é possível recuperar energia e será preciso desligar a frenagem elétrica e manter o freio mecânico.

A Figura 3.13 (b) mostra a velocidade no motor que segue a velocidade de referência estabelecida. Para baixas velocidades usa-se o freio mecânico para manter a desaceleração até a parada do veículo.



Figura 3.124 Simulações: (a) Rotação de Referência(RPM), (b) Rotação no Motor(RPM)

O torque de referência para a frenagem é de 200 Nm, valor este que deve corresponder à soma dos torques frenantes elétrico e mecânico.

Inicialmente, como o freio regenerativo ultrapassa ligeiramente este valor, o freio mecânico não atua, passando a ser ativado nas situações de menor torque eletromagnético e, como previsto no procedimento de frenagem, realizando a etapa final até a parada do veículo.

A Figura 3.14 (a) mostra o torque eletromagnético. A parte inicial corresponde à aceleração, à qual se segue o intervalo de cruzeiro e, em seguida, a frenagem, com torque determinado pela estratégia 2. Portanto, o comportamento do torque mecânico em (b) permite atuar na desaceleração para obter uma desaceleração suave. A figura (c) mostra a corrente de uma das fases do motor no ciclo de condução.

A Figura 3.15 apresenta os dados durante o ciclo de condução. A Tabela V apresenta os dados desta simulação, no qual se recupera 50 % da energia fornecida.

Tal resultado é semelhante ao da Tabela III. Isso significa que, desde que o consumo de energia na etapa de cruzeiro seja pequeno, a energia recuperável depende da velocidade no início da frenagem.



Figura 3.135 Simulações de uso combinado de frenagem e freio mecânico: (a) Torque de frenagem elétrica (N.m) (b) Torque mecânico(N.m) e (c) Corrente de estator da Fase a (A)

Potência de Pico	28kW
Corrente de Pico	96 A
Tensão Inicial	320 VCC
Tensão Final	315.5 VCC
Energia Fornecida	53 kJ
Energia Recuperada	28 kJ

Tabela V: Variáveis Elétricas da Estratégia 2

A energia fornecida é menor, em comparação com a Tabela III, porque os tempos de aceleração e de cruzeiro são menores. A recuperação de energia é maior porque o tempo de frenagem é menor, o que minimiza as perdas aerodinâmicas, que não são recuperáveis.



Figura 3.14 Variáveis elétricas durante o ciclo de condução: (a) Tensão no Banco de SC(V), (b) Corrente na entrada do Banco de SC (A), (c) Potência Regenerada (W) e (d) Energia Fornecida e Recuperada do Banco de SC

3.7 Conclusões do Capítulo

Os resultados de simulação indicaram a ineficácia da FR em baixas velocidades devido à oscilação observada no torque eletromagnético da máquina e à existência de perdas no sistema. Isso levou à decisão de inibir a frenagem elétrica abaixo de uma velocidade na qual já não ocorre recuperação de energia. Tal limite foi estabelecido em 150 rpm.

O final da frenagem se realiza exclusivamente com freio mecânico, o qual é ajustado para apresentar o mesmo torque frenante, sem qualquer descontinuidade.

A porcentagem de recuperação de energia depende da taxa de desaceleração, uma vez que frenagens longas implicam em um aumento de perdas aerodinâmicas, de atrito e elétricas.

O valor absoluto recuperado, obviamente, depende da velocidade inicial.
Capítulo 4

Resultados Experimentais

No sistema implementado no LAFER/FEM, buscou-se reproduzir os comportamentos analisados na simulação computacional.

4.1 Descrição e Estudo da Bancada

Para o estudo da frenagem regenerativa em veículo elétrico foi implementado um sistema de freio que emula uma roda dianteira, considerando uma massa equivalente à quarta parte de um veículo. O sistema experimental já foi apresentado na figura 3.1, assim como os equipamentos.

A Figura 4.1 mostra os elementos do sistema de freio mecânico: bloco A é a válvula proporcional (Vp) usada para aplicar a pressão no freio através do sistema pneumático, visto no bloco B. No Bloco C tem-se a pinça no disco de freio que permite aplicar a força de atrito.



Figura 4.1 Elementos do Sistema de Freio de Atrito

Na Figura 4.2 apresenta-se o banco de supercapacitores, com capacitância total de 19F. São 8 módulos no total sendo 5 módulos (EPCOS) de 150F/ 42V e 3 módulos (MAXWELL) de 165F/46V. Os supercapacitores são prévia e individualmente carregados com 30V por meio de uma fonte (ao centro da figura), garantindo o suprimento de energia para cada ensaio.



Figura 4.2 Banco de Supercapacitores

Na Figura 4.3 apresenta-se o quadro elétrico onde, internamente, encontra-se o inversor de frequência. A alimentação do banco de supercapacitores será colocada no barramento CC do equipamento.



Figura 4.3 Quadro Elétrico do inversor

A Figura 4.4 mostra a placa condicionadora de sinais para as medições de corrente e de tensão no barramento CC, necessárias para o cálculo de potência e energia.



Figura 4.4 Sistema de acondicionamento dos sinais dos sensores

Na Figura 4.5 mostra o diagrama de blocos dos elementos em conjunto.



Figura 4.5 Diagrama de Blocos da Bancada Experimental

4.1.1 Estudo do Sistema de Freio Mecânico

O freio mecânico é controlado por uma válvula proporcional. O acionamento da válvula proporcional faz com que o cilindro pneumático aplique uma força no atuador hidráulico, produzindo uma pressão à pinça, ocasionando a frenagem por atrito entre o disco e a pastilha de freio [19].

A Figura 4.6 apresenta a calibração da tensão da válvula proporcional e a força Normal aplicada.



Figura 4.6 Calibração da válvula proporcional

A equação linear 4.1.1, obtida da calibração, será colocado no programa de controle (elaborado em LabView ®) para realizar os testes de frenagem.

$$V_p = \frac{F_N + 1133,9}{786,08} \tag{4.1.1}$$

A Tabela VI mostra os parâmetros usados para o sistema de freio de atrito nos ensaios.

Tabela VI: Parâmetros da roda e freio

Raio do Pneu (Rp)	0,2876	m
Inércia da Roda (J _R)	38,3	kg/m ²
Coeficiente de Aderência (µ)	0,35	adm.
Raio médio no Disco (R _D)	0,095	m
VE Massa	1317	kg

Para operar o inversor Weg foi necessário configurar na programação a rampa de desaceleração como se apresenta na Figura 4.9, pois este é o único parâmetro disponível, do ponto de vista elétrico, para fazer a frenagem elétrica.

Em relação às rampas de redução de velocidade (frequência) pode-se estabelecer uma relação entre os ângulos das rampas de redução e as desacelerações nas frenagens, por exemplo, para intervalos de 9 s ou de 12 s, como representados por $\alpha \in \beta$, onde $\alpha > \beta$.



Figura 4.7 Tempo Rampas de redução de frequência

Como o objetivo é combinar o uso do freio elétrico e mecânico, foi preciso obter uma relação com o sistema de freio do atrito. A equação 4.1.2 mostra a relação da força normal aplicada na pinça e as desacelerações usadas para os testes experimentais de cada estudo da frenagem.

$$F_N = \frac{J_R * Desacelera\,\tilde{\zeta}ao}{2*R_D * R_P * \mu} \tag{4.1.2}$$

A Figura 4.8 apresenta a relação dos tempos das rampas de redução de frequência do inversor com as médias das desacelerações experimentais nas frenagens elétricas, representada em uma equação polinomial. Com isso é possível saber com qual intensidade o freio mecânico deve ser acionado para garantir a mesma desaceleração da frenagem elétrica. Com o uso da equação 4.1.2 pode-se obter as forças aplicadas para as rampas de redução de frequência como mostra a Figura 4.9.



Figura 4.8 Tempos da rampa de desaceleração do inversor com relação à redução de frequência (m/s²)





Na Figura 4.10 mostra a tensão aplicada na válvula proporcional do sistema de freio mecânico para diversos tempos da rampa de redução de frequência.



Figura 4.10 Tensão aplicada na válvula proporcional no sistema de Freio

A Figura 4.11 apresenta a frenagem elétrica do motor a partir de uma rotação na roda de 400 rpm e no motor de 1000 rpm, configurando as rampas de desaceleração para os tempos de desaceleração (Td) de 10 s e de 12 s. Para baixas frequências, o inversor não tem controle da frenagem e o sistema para lentamente em função das perdas mecânicas.

Na Figura 4.12 estão os resultados da potência para ambos tempos de desaceleração. Para um Td=10 s recupera-se mais energia que com tempos nas rampas de desaceleração maiores porque, com parada mais rápida, as perdas aerodinâmicas e de atrito são menores.



Figura 4.11 Variação de velocidade com frenagem elétrica para Td=10 s e Td=12 s



Figura 4.12 Potência elétrica na fonte com frenagem elétrica para Td=10 s e Td=12 s

Dada a incapacidade do freio elétrico garantir a desaceleração em baixa velocidade, o freio mecânico é acionado quando a rotação atinge 150 rpm, ajustado de modo a manter a mesma desaceleração até a parada. A Figura 4.13 mostra que, como tal funcionamento, se mantém a desaceleração constante até a parada.



Figura 4.13 Frenagem combinada elétrica (até 150 rpm) e mecânica.

4.2 Resultados do Estudo Experimental

4.2.1 Estudo 1: Frenagem Elétrica

Consiste no uso da frenagem elétrica na desaceleração, com rampa de desaceleração configurada no inversor. A Figura 4.14 mostra tela do LabView com o resultado da frenagem com rampa de redução de frequência de Td=10 s, rotação inicial de 800rpm e força Normal de 4339 N. A Figura mostra a evolução da rotação no motor e na roda, a tensão no banco de SC e a corrente. O inversor não permite um controle em baixas frequências e a parada no motor se dá por inércia. A Tabela VII apresenta as grandezas elétricas obtidas no estudo.



Figura 4.14 Resultados da Frenagem Elétrica

Potência de Pico	15 kW
Corrente de Pico	60 A
Tensão Inicial	307 VCC
Tensão Final	301 VCC
Energia Fornecida	64 kJ
Energia Recuperada	28 kJ

Tabela VII: Variáveis Elétricas da Frenagem Elétrica

A Figura 4.15 mostra a potência no banco de supercapacitores para uma velocidade máxima na roda de 34 km/h. Observa-se que em baixas velocidades o freio não recupera energia.



Figura 4.15 Potência no banco de SC.

4.2.2 Estudo 2: Freio de atrito

Este ensaio reproduz as condições da frenagem elétrica, mostradas na Figura 4.14, empregando apenas o freio mecânico com o devido ajuste para que resulte a mesma desaceleração.

Nesse caso não há recuperação de energia e a frenagem ocorre de forma homogênea até a parada do motor e roda. Para o teste, quando se ingressou na etapa de desaceleração, foi desligado o sistema elétrico.



Figura 4.16 Resultados de Freio de Atrito

4.2.3 Estudo 3: Frenagem combinada

Nesta frenagem combinada será usada a frenagem elétrica na desaceleração e a frenagem de atrito para baixas frequências. A Figura 4.17 mostra um dos resultados obtidos, para um tempo da rampa de redução de frequência Td=12 s. Os resultados da velocidade da roda e do motor, tensão do banco de supercapacitores e corrente permitem ver que nas baixas frequências o comportamento da velocidade na roda mantém uma desaceleração suave até a parada. Nessa etapa está sendo aplicado o freio de atrito. Em baixa frequência foi desligado o sistema elétrico, levando a corrente a zero. A Tabela VIII mostra as variáveis elétricas obtidas do teste experimental no banco de SC.



Figura 4.17 Resultados da Frenagem Combinada

Potência de Pico	15kW
Corrente de Pico	65 A
Tensão Inicial	286 VCC
Tensão Final	278 VCC
Energia Fornecida	65 kJ
Energia Recuperada	20 kJ

Tabela VIII: Variáveis Elétricas da Frenagem Combinada

Esta frenagem combina a frenagem elétrica para o início da desaceleração e frenagem mecânica em velocidade menor que 150 rpm. A Figura 4.18, em comparação com a Figura 4.15, mostra que deixa de existir refluxo de potência no final da frenagem, pois o freio elétrico é desativado pois em baixa velocidade perde eficácia.



Figura 4.18 Potência no Banco de SC

Realizou-se outro teste experimental para a frenagem combinada, desta vez com rampas variáveis, como mostra a figura 4.19. Foi possível configurar, no início da frenagem, um tempo maior da rampa de redução de frequência (Td=18 s), que se altera no transcurso da desaceleração para um Td=8 s. A Figura 4.20 mostra um pico de potência menor no início da frenagem comparado com o caso de maior desaceleração inicial. Ao se alterar a referência de frenagem há outro aumento na potência associado ao crescimento do torque frenante demandado. O freio mecânico atua em baixas frequências. A Tabela IX mostra as grandezas elétricas para este teste experimental.

Potência de Pico	10kW
Corrente de Pico	58 A
Tensão Inicial	278 VCC
Tensão Final	271 VCC
Energia Fornecida	65 kJ
Energia Recuperada	14 kJ

Tabela IX: Variáveis Elétricas da Frenagem Combinada

A potência fornecida e recuperada é apresentada em detalhe na Figura 4.20.



Figura 4.19 Resultados da Frenagem Combinada com rampa variável



Figura 4.20 Potência no banco de SC

4.2.4 Estudo 4: Frenagem Combinada com Freio Mecânico

Neste caso tanto a frenagem elétrica quanto a mecânica atuam simultaneamente, sem desligar o sistema elétrico. Apresentam-se os resultados na Figura 4.21.

Na Figura 4.21 (a) mostra o comportamento dos freios elétrico e mecânico aplicados simultaneamente e com tempos de rampas de redução variáveis. O início da desaceleração foi com um Td=10 s e, no transcurso, há mudança para Td=19 s, portanto na rotação da roda realiza uma parada côncava, porque a frenagem elétrica é menor e o freio mecânico aplicado está impondo na frenagem com baixas frequências.

A atuação do freio mecânico faz com que a velocidade do motor se torne menor do que aquela determinada pela rampa de redução de frequência do inversor. A consequência é que a máquina volta a atuar como motor, o que se verifica pela potência positiva na Figura 4.21 (b). Do ponto de vista da eficiência energética esse comportamento é inadequado devido a que não está atuando a máquina elétrica com escorregamento negativo.



Figura 4.21 Resultados da frenagem combinada com freio mecânico com rampa variável

O uso concomitante do freio elétrico e do freio mecânico é possível, conforme foi mostrado nos resultados de simulação, mas deve ser implementado com uma referência para o inversor que seja menor do que a efetiva velocidade mecânica equivalente, garantindo escorregamento negativo.

Experimentalmente tal procedimento não foi possível de ser implementado pois o inversor disponível não admite tal entrada de referência. Os resultados que seguem foram obtidos reduzindo o torque do freio mecânico, de modo a manter o efeito regenerativo, como mostram as figuras a seguir.

Devido à força normal menor aplicada, com o fim de manter o escorregamento negativo, a máquina de indução trabalha como gerador durante toda desaceleração.

Aplicando na válvula proporcional 30% da tensão calculada anteriormente, conseguese que o sistema de freio atue com uma força normal menor, portanto o sistema trabalha com os dois freios simultaneamente, conseguindo recuperar energia como é mostrada na Figura 4.22(a). Também para 45% e 47,5 %, ainda há energia recuperada ao banco de supercapacitores.



Figura 4.22 Resultados da frenagem combinada com freio mecânico (a) com Vp=30%*Vpi, (b) com Vp=45%* Vpi e (c) com Vp=47,5%* Vpi

A Figura 4.23 mostra uma aplicação na tensão da válvula proporcional de 50%, em relação às figuras anteriores, com uma parada mais rápida e, em relação à frenagem elétrica, uma menor recuperação de energia, o que também se verifica na Tabela X.



Figura 4.23 Resultados da Frenagem Combinada com Freio Mecânico

Potência de Pico	17kW
Corrente de Pico	60 A
Tensão Inicial	293 VCC
Tensão Final	286 VCC
Energia Fornecida	68 kJ
Energia Recuperada	16 kJ

Tabela X: Variáveis Elétricas do Freio Compartilhado

4.3 Conclusões do Capítulo

Os estudos na bancada experimental da frenagem elétrico, do freio de atrito e a da frenagem combinada, permitiram a comprovação dos resultados de simulação, validando a modelagem utilizada.

- O estudo da frenagem elétrica mostrada na bancada experimental demostra que o controle do inversor não permite controlar em baixas frequências, portanto foi preciso usar a estratégia de controle definida na simulação.
- A frenagem combinada apresentou-se de forma adequada e compatível com o simulado. O freio mecânico aplicado conseguiu realizar a parada suave em baixas velocidades.

Capítulo 5

Conclusões e perspectivas

5.1. Conclusão Geral

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver estratégias de controle e analisar e verificar o procedimento de frenagem regenerativa de um veículo elétrico de pequeno porte, de uso urbano, acionado por um motor de indução através de inversor alimentado por um banco de supercapacitores.

- Observou-se que a recuperação de energia está diretamente relacionada com a energia cinética no início da frenagem e, por conseguinte, dependente do ciclo de condução considerado. O consumo de energia relacionado com perdas aerodinâmicas, atrito em perdas gerais e elétricos no arranque do sistema, obviamente, não pode ser recuperado.
- Os resultados indicam a necessidade do uso combinado da frenagem elétrica e mecânica.

- Foi observado que, em baixas velocidades, o torque eletromagnético apresenta oscilações altas que não permitem ter um controle preciso do veículo na desaceleração.
- Quando o torque de frenagem solicitado for maior do que a capacidade de absorção de energia da fonte elétrica (incluindo os conversores) ou em situações de emergência, também é necessário o uso dois freios.
- Abaixo de um certo limite de velocidade, quando a energia cinética é já muito baixa, propõe-se a utilização apenas de freio mecânico, assegurando o torque de frenagem desejado.
- A combinação de freios elétricos e mecânicos deve provocar uma desaceleração que esteja em conformidade com o comando entrada dado pelo condutor através do pedal de freio.
- Simulações e resultados experimentais confirmam as expectativas e indicam a viabilidade de tal ação combinada de ambos sistemas de freio.

5.2. Perspectiva de trabalhos futuros

Dentre as várias perspectivas de trabalhos futuros é possível destacar:

- Implementar na bancada o sistema de controle usado na simulação.
- Implementar o sistema da bancada para um controle no malha fechada, com realimentação de velocidade.
- Implementar o sistema de freio hidráulico na bancada.
- Estudo do veículo quando é aplicado em diferentes tipos de percursos.
- Estudar o efeito da variação do coeficiente de aderência durante a operação do sistema.

Bibliografia

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ABVE, O Futuro dos veículos elétricos [Disponível em http://www.abve.org.br/downloads.asp], 2011.

[2] Pay, S.; Baghzouz, Y. "Effectiveness of battery-supercapacitor combination in electric vehicles", *IEEE Bologna PowerTech Conference, June 23-26, Bologna, Italy*,2003

[3] M.K Yoong; Y.H Gan; G.D Gan; C.K Leong; Z.Y Phuan; B.K Cheah; K.W Chew. "Studies of Regenerative Braking in Electric Vehicle", Proc. of *IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology*, 2010.

[4] Meilan Zhou; Zhaoming Gao; Hao Zhang. "Research on Regenerative Braking Control Strategy of Hybrid Electric Vehicle", Proc. of *IEEE 2011 The 6th International Forum on Strategic Technology*, 2011.

[5] Jingang Guo, Junping Wang and Binggang Cao; "Regenerative Braking Strategy for Electric Vehicles", Proc. of *IEEE Conference Intelligent Vehicles Symposium*, 2009

[6] Ling CAI; Xin ZHANG. "Study on the Control Strategy of Hybrid Electric Vehicle Regenerative Braking", Proc. of *IEEE 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, 2011.

[7] Wei Cui; Hang Zhang; Yan-li Ma; Yue-jin Zhang. "Regenerative Braking Control Method and Optimal Scheme for Electric Motorcycle", Proc. of *IEEE 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2011.

[8] Guoqing Xu; Weimin Li; Kun Xu and Zhibin Song, "An Intelligent Regenerative Braking Strategy for Electric Vehicles", *Energies* 2011, *4*, 1461-1477; doi:10.3390/en4091461.

[9] Zoran Nikolić, Zlatomir Živanovic. "The Contribution and Prospects of the Technical Development on Implementation of Electric and Hybrid Vehicles" [Disponível em http://www.intechopen.com/books/new-generation-of-electric-vehicles /the-contribution-and-prospects-of-the-technical-development-on-implementation-of-electric-and-hybrid] 2012.

[10] Kléber Zuza Nóbrega, Carlos Henrique Lima Veloso, Cleyton Lima Costa. "Aplicações para a tecnologia de transmissão de energia wireless através da indução magnética e sistemas ressonantes" *VII CONNEPI - Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação*. Palmas, 2012.

[11] Tyler Hamilton, Next Stop: Ultracapacitor Buses, [Disponível em http://www.technologyreview.com/news/415773/next-stop-ultracapacitor-buses/] 2009.

[12] Motor Dream, Salão de elétricos mostra o Brasil longe da vanguarda [Disponível em http://motordream.uol.com.br/noticias/ver/ 2012/08/17/salao-de-eletricos-mostra-obrasil- longe- da- vanguarda], 2012.

[13] INEE,VeículosElétricos[Disponívelemhttp://www.inee.org.br/veh_sobre.asp?Cat=veh]2013.

[14] BBC, Plan to boost electric car sales [Disponível em http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/8001254.stm] 2009.

72

[15] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, A. Emadi, "Modern electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design", second edition, USA: CRC Press, 2008.

[16] Bim, E. "Máquinas Elétricas e Acionamento". [S.l.]: Elsevier, 2009.

[17] Ferreira, A.A., Sistema Supervisório de Gestão de Múltiplas fontes de suprimento para Aplicações em Veículos Elétricos.2007. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

[18] Motores de indução alimentados por inversores de freqüência PWM

[Disponívelemhttp://www.weg.net/br/content/search?tipo=downloads&SearchText=motores de inducao alimentados por inversores] 2010.

[19] W. Lhomme; P.Delarue; P.Barrade; A.Bouscayrol; A.Rufer, "Design and Control of a Supercapacitor Storage System for Traction Applications", Proc. of *IEEE Industry Applications Society (IAS)* Annual Meeting, 2005.

[20] L. Solero; A. Lidozzi; J.A Pomilio. "Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 20, No. 5, Sept. 2005 Page(s):1007 – 1016.

[21] Battery University, Basics about Discharging [Disponível em http://batteryuniversity.com/learn/article/ discharge_methods] 2012.

[22] Jian Cao, Nigel Schofield, Ali Emadi. "Battery Balancing Methods: A Comprehensive Review", *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, September 3-5, 2008, Harbin, China.

[23] Ferreira, A. A.; Pomilio, J. A. "Estado da arte sobre a aplicação de supercapacitores em eletrônica de potência", Eletrônica de Potência, Santa Maria, RS, v. 10, Fac. 2, p. 25 – 32, 2005.

[24] A. Burke, "Ultracapacitors: why, how, and where is the technology,", Journal of Power Sources, Vol. 91, Issue 1, November 2000, Page(s): 37 - 50.

[25] Santos, A. H. C. "Uma contribuição ao estudo dos freios de atrito para aplicação em frenagem regenerativa". 2009. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

[26] A. A. Ferreira, J. A. Pomilio, G. Spiazzi e L. de Araujo Silva,: "Energy Management Fuzzy Logic Supervisory for Electric Vehicle Power Supplies System", *IEEE Transactions* on Power Electronics, Volume 23, Issue 1, Jan. 2008 pp. 107 – 115.

 [27] G. Giuseppe; "Energy Management Systems on Board of Electric Vehicle, based on Power Electronics". 2009. Ph.D. Dissertation, – Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering, Norwegian University of Science and Technology – Trondheim, Norway.

[28] Frigeri, J. A.; Bianchi, M.; Backes, R. G.Giuseppe; "Um Estudo sobre o uso das Técnicas de Simulação no processo de elaboração e execução dos planejamentos Estratégico e Operacional", ConTexto, Porto Alegre, v. 7, n. 12, 2º semestre 2007.

[29] Xiangpeng Yu; Tielong Shen; Gangyan Li; Hikiri, K. "Regenerative Braking Torque Estimation and Control Approaches for a Hybrid Electric Truck", *American Control Conference (ACC)*, 2010.

Apêndice I – Divulgação da Pesquisa

M.G.S.P. Paredes, J.A.Pomilio, N. Mastelari. "Modelagem de Frenagem Regenerativa em Veículo Elétrico". Revista Ciência e Tecnologia, v.15, n.27, p.15-21, jul./dez. 2012

M. G. S. P. Paredes, José A. Pomilio, Auteliano A. Santos. "Combined Regenerative and Mechanical Braking in Electric Vehicle". Aceito para publicação em: Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, 2013, Gramado. 12º COBEP, 2013

Apêndice II – Potência e Energia

Potência:

Para os sistemas elétricos, o produto de uma tensão v(t) por uma corrente i(t) representa a potência instantânea em um circuito.

v(t)=Tensão entre os condutores.

i(t) = Corrente pelos condutores.



Figura II1 Circuito elétrico.

$$p(t) = v(t) * i(t)$$

Potência Ativa é o valor médio da potência instantânea.

$$P = \overline{p(\tau)} = \frac{1}{T} \int_0^T p(\tau) \, d\tau$$
$$P = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi p(\tau) \, d\tau$$
$$P = \overline{p(\tau)} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi v(\tau) * i(\tau) \, d\tau$$

Energia:

A energia (E) é a integral no tempo da potência instantânea. Considerando o sinal da Figura II2, calcula-se:

$$E = \int_{T_o}^{T_f} P dt$$

 $E_{Total} = E_A + E_B + E_C$ Potência (kW)
Potência (kW)
Potência (kW)
Potência (kW)
C
C
Tempo (s)

Figura II2 Potência instantânea durante trajetória do VE.

Intervalo A (t=0s – t=5s):

$$E_{A} = \frac{1}{2} * 20kW * 5s = 50kJ.$$

Intervalo B (t=5s - t=8s):

$$E_{R} = 2kW * 3s = 6kJ$$

Intervalo C (t=8s-t=12s):

$$E_C = \frac{1}{2} * -17kW * 4s = -34kJ$$

$$E_{Total} = 50kJ + 6kJ - 34kJ = 22kJ$$

Apêndice III – Transmissão de Movimento

Momento de Inércia:

O momento de inércia é uma grandeza que mede a dificuldade na aceleração ou frenagem de um corpo em movimento rotacional como são as rodas do veículo, redutor e o motor. É expresso em Kg.m².

O momento de inércia total do sistema é a soma dos momentos de inércia das massas em rotação.

Considerando o acionamento do motor com uma caixa redutora apresentado na Figura III, calcula-se a inércia total desde o eixo do motor.

Temos os dados seguintes:

JM = momento de inércia do motor de 60 cv - 4 polos.

JR = momento de inércia da roda.

a = Relação de engrenagens

B = Atrito viscoso é reduzido.

$$J_{M} = 0,69987 \ Kg.m^{2}$$

 $J_{R} = 38,32 \ Kg.m^{2}$
 $a = 1/2,5 = 0,4$
 $B \approx 0$

$$T_{R} = J * \frac{\partial(\omega_{R})}{dt} + B * \omega_{R}$$



Figura III Acionamento da carga com uso do redutor (caixa de engrenagens)

Para o Torque de carga referido ao eixo do motor usa-se a relação de engrenagens, sendo:

$$T_{EM} = a * T_R$$
$$\omega_R = a * \omega_M$$

Quando um motor é acoplado a uma carga (Roda) mediante uma caixa redutora, ocorre uma redução de inércia referida ao eixo do motor:

$$J_{EM} = a^2 * J_R$$

 $J_{EM} = (0,4)^2 * 38,32 = 6,1312 \ Kg.m^2$

Portanto, a inércia total no eixo no motor é:

$$J_{Total} = J_M + J_{EM}$$
$$J_{Total} = 0,69987 + 6,1312 \cong 6,83 \ Kg.m^2$$

Apêndice IV – Esquemáticos

Condicionamento dos canais de tensão e de corrente:

Os sensores de tensão e corrente são o LV-20P e o LA-100P, ambos fabricados pela empresa LEM.



Fontes de alimentação Linear:

Circuito de alimentação linear da placa de condicionamento de sinais.



Apêndice V – Programa da Bancada Experimental

Os estudos experimentais foram desenvolvidos mediante o uso do programador gráfico Labview. A área do trabalho do programador se divide em 2 telas: tela frontal e diagrama de blocos.

A Figura V1 é a tela frontal do programador gráfico Labview e mostra 3 blocos que serão detalhados:

- No bloco 1 apresenta a configuração para um inversor de frequência realizada no início do teste, usando a porta serial para a transmissão de dados. Para o sistema foi preciso a informação de rotação do motor (RPM) e a redução de frequência (Tempo de descida) após de finalizadas as configurações, deve-se *clicar* em RUN para dar continuidade ao programa, e STOP se é necessário parar o programa.

- O bloco 2 mostra o cálculo da força normal aplicada na pinça de freio e a rotação do motor quando está em operação.

- O bloco 3 permite variar a configuração de redução de frequência (Mudar_Td) no inversor quando ele está em operação após de *clicar* no botão CS para o envio da nova configuração. Com esta opção se obtiveram os resultados experimentais mostrados na Figura 4.20.

A parte inferior direita apresenta visualizadores *Leds* quando está correndo o programa RUN, quando realiza parada do teste STOP e quando é aplicado o freio mecânico APLICA, mostra ainda o tempo total do teste em *Elapsed Time*. Na parte inferior esquerda apresentam-se 4 indicadores gráficos: rotação do motor, rotação da roda, tensão e corrente.

83



Figura V1 Tela Frontal do Programador Gráfico Labview

Programa em diagrama de Blocos

Para todos os estudos foi realizado um diagrama de blocos por 2 sequências. A continuação mostra os casos realizados dentro da primeira sequência que vai se manter para todos os estudos.
Primeira Sequência







Segunda Sequência

A sequência mostra o programa por partes. Dependendo do estudo será alterado algumas partes que será indicado no contexto.



Etapa alterada para o estudo de frenagem combinada.





Etapa alterada para o estudo de frenagem em atrito

Etapa alterada para o estudo de frenagem combinada com freio mecânico.





Este evento indica o início de um ciclo de condução após de clicar em RUN.

Ingressa neste evento só quando é necessária a mudança de redução de frequência enquanto o programa está executando um ciclo de condução.





Para dar parada ao inversor de frequência será executado o caso seguinte.