

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM
ACIONAMENTO ELÉTRICO EMBARCADO PARA
AUXÍLIO À TRACÇÃO HUMANA EM SISTEMAS DE
TRANSPORTE DE CARGA**

Leonardo Adolpho Rodrigues da Silva

TESE APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS- GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DE MINAS GERAIS PARA O EXAME FINAL
DO CURSO DE DOUTORADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Orientador: Prof. Braz de Jesus Cardoso Filho, PhD

Durante o desenvolvimento deste trabalho o autor recebeu auxílio financeiro da Universidade Federal de São João del Rei, bem como do Laboratório Tesla e do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, março de 2014

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM
ACIONAMENTO ELÉTRICO EMBARCADO PARA
AUXÍLIO À TRACÇÃO HUMANA EM SISTEMAS DE
TRANSPORTE DE CARGA**

Esta é a versão original da tese elaborada por
Leonardo Adolpho Rodrigues da Silva, tal como
submetida à Comissão Julgadora.

Agradecimentos

O presente trabalho é dedicado em graças a Deus, o qual proveu saúde e conforto nos momentos de exposição aos meus limites físicos, intelectuais e psicológicos, bem como proveu proteção aos incontáveis riscos apreciados em aproximadamente 28.000 km dirigidos em estradas até o presente estágio do trabalho.

Agradeço à minha família pelo amplo suporte prestado em todos os momentos difíceis. Aos meus pais, à Ge e aos meus irmãos, deixo o forte abraço e o desejo de retribuição a toda consideração com minha pessoa !

Agradeço ao professor Braz de Jesus Cardoso Filho pela orientação e sugestões técnicas valiosas na condução do trabalho.

À equipe da Universidade Federal de São João del Rei agradeço pelo suporte profissional, pessoal e material que me foram dedicados nesse tempo de trabalho. Aos professores Lane Baccarini, Gleison Vasconcelos, Márcio Falcão e Valéria Kemps, muito obrigado !

À equipe do laboratório Tesla, muito obrigado pela conversa agradável e ampla disponibilidade para ajuda em todos os momentos do trabalho. É um grande prazer conviver com os senhores e senhoras !

Agradeço também à pronta disponibilidade e receptividade encontrada no Centro de Tecnologia da Mobilidade instalado no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. Ao professor Fabrício Pujatti, muito obrigado pelas horas dedicadas à manutenção do veículo, pelas dicas técnicas e pela pronta disponibilidade no atendimento às perguntas que lhe foram apresentadas. Agradeço também à oportunidade de aprender sobre seu estilo de condução harmônica entre uma vida profissional densa e o respeito a quem o procura.

Aos professores Guilherme Pereira e Leonardo Torres, agradeço pelas preciosas dicas de contextualização do trabalho com o estado da arte nas ferramentas de sistemas robóticos que foram aplicados ao Vecarr.

Aos alunos que participaram voluntariamente ou dedicaram seus projetos de conclusão

de curso a estruturas aplicadas ao Vecarr, deixo meu sincero agradecimento. A ajuda dos senhores Júlio César, Luiza Alves, Mariana Sacramento, Caio, Rodolfo, Juliana Cunha, Victor, Potyguara, Guilherme e Carlos Detomi aceleraram o trabalho e o tornaram mais agradável.

Agradeço também à Associação de Catadores de Papel de São João del Rei, cujos membros prestaram valiosas informações relacionadas às demandas típicas de um potencial cliente do Vecarr.

Resumo

Silva, L. A. R. **Projeto e Implementação de um Acionamento Elétrico Embarcado para Auxílio à Tração Humana em Sistemas de Transporte de Carga.** 2013. 190 f. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

A presente tese de doutorado apresenta uma metodologia completa para o projeto e síntese de uma solução para o auxílio à pessoas que necessitem deslocar cargas em atividades profissionais ou cotidianas. Essa solução agrega a capacidade de produção de força mecânica de acionamentos elétricos com a capacidade do cérebro humano para determinação das referências de trajetória que são impostas ao acionamento. Como o acionamento elétrico se encontra embarcado em um veículo, o mesmo é qualificado como um robô e, nessa abordagem, a solução apresentada se configura como um sistema de cooperação homem-robô. Para o projeto e construção de tal sistema, foram avaliados os danos músculo-esqueléticos provocados à saúde de trabalhadores que trabalham com deslocamento humano de cargas, bem como foram avaliados os trabalhos que conotam o estado da arte na tecnologia de cooperação homem-robô. Dessa última avaliação observou-se que os sistemas de cooperação possuem estrutura construtiva muito cara, capacidade máxima de carga muito baixa ou mesmo descartam opções de projeto que priorizem o conforto sentido pela pessoa que interage com o veículo. Tais oportunidades de contribuição foram então exploradas através de um projeto detalhado, o qual resultou na especificação dos elementos de potência que desempenham da maneira mais eficiente e econômica as atividades monitoradas em um grupo profissional específico tomado como cenário exemplo para a metodologia. Destaca-se que nessa metodologia é apresentada uma proposta inovadora para determinação dos conjugados de carga, a qual dispensa a medição de velocidade angular e da inclinação da superfície onde o veículo se move. Para se garantir uma operação segura do Vecarr, o trabalho apresenta a caracterização das dinâmicas de força humana em intenções de empurrar o veículo, bem como a dinâmica de suas pernas. Mediante tal caracterização, foram sintetizadas malhas de controle que permitem diferentes modos operantes para a solução de

transporte, sendo tais modos relacionados à priorização de uma dentre duas premissas: o conforto percebido no toque da pessoa que conduz o veículo ou a possibilidade de se desenvolver velocidades finais mais elevadas. Qualquer dessas opções é prontamente adaptável ao veículo, demandando somente intervenções em software ou remoção da célula de carga. Além disso, em qualquer um dos modos operacionais são garantidas as seguintes características: o veículo se desloca pela intenção de movimento de seu condutor, dispensando treinamento específico; o veículo se mantém parado em superfícies inclinadas, mesmo quando o usuário acopla ou remove carga de sua caçamba; o usuário impõe dinamicamente a velocidade de deslocamento do sistema e o veículo segue tal referência.

Palavras-chave: cooperação homem-robô, intenção de movimento, transporte de carga, conforto ao toque, veículo elétrico

Abstract

Silva, L. A. R. **Project and Implementation of an Embedded Electrical Drive to Aid the Human Traction in Load Transportation Systems**. Qualifying exam - PhD Degree - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. PhD Thesis - Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

The current PhD thesis presents a complete methodology applied to project and construction of a solution applied to aid people who need to move loads in professional or daily activities. This solution joins the capacity of electrical drives to produce mechanical force with the human brain's capacity to choose the trajectory references demanded by the drive. Since the electrical drive is embedded into a vehicle, the last is qualified as a robot and, in this approach, the present solution is qualified as a human-robot cooperation system. To project and build this system, it were evaluated the muscle-skeleton diseases committed by people who work with load displacements executed by humans, as it were evaluated the scientific jobs which describe the state-of-art in the human-robot cooperation technology. From the last evaluation, it was observed that the cooperation systems have a very expensive constructive structure, a net load capacity very low or even they are not developed taking into account project options to aid in the comfort perception by the person who interacts with the vehicle. Such contribution opportunities were so explored through a detailed project, which resulted in the rating of power elements capable to develop in the most efficient and economic way the monitored activities done by a specific professional group taken as an example scenario for the methodology. It's highlighted that this methodology presents an innovative approach to determine the load torque, which rejects the necessity to measure the inclination from the surface where the vehicle is moving. To ensure a safety operation to Vecarr, it was researched the force dynamic commands imposed by the human intention to move the vehicle, as the dynamics of the legs movement. From these studies, it were synthesized controllers that enable different operational modes to the load transportation solution, being those modes related to the following boun-

dary conditions: the touch comfort sensed by the person that cooperates with the vehicle or the possibility to develop higher final speeds. Any of those options is readily attachable to the vehicle, demanding just software modifications or load cell removal/installation. In any of those operational modes, there are guaranteed the following characteristics: the vehicle is moved by the human intention, dispensing any specific training; the vehicle is kept stopped in inclined surfaces, even when the user embed or remove loads from its chart; the user choose dynamically the vehicle's displacement speed.

Keywords: human-robot cooperation, movement intention, load transportation, touch comfort, electric vehicle

Sumário

Lista de símbolos	xi
1 Introdução	1
1.1 Apresentação	1
1.2 Relevância	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Contribuições	4
1.5 Organização do texto	6
2 Tecnologias para sistemas de cooperação homem-robô e para detecção da intenção de movimento de pessoas	9
2.1 Tecnologias para detecção da intenção de movimento	10
2.1.1 Detecção da intenção de movimento em sistemas de direção elétrica . . .	10
2.1.2 Detecção da intenção de movimento por acelerômetros	13
2.1.3 Detecção da intenção de movimento por sinais biológicos	13
2.1.4 Detecção da intenção de movimento por câmeras e luvas com filmes de strain-gage	14
2.1.5 Detecção da intenção de movimento pela corrente de motores elétricos . .	15
2.2 Estado da arte na cooperação homem-robô	16
2.2.1 Caracterização geral da cooperação homem-robô	16
2.2.2 Sistema de cooperação homem-robô com determinação prévia das trajetórias de referência pelo contato da pessoa com o robô	19
2.2.3 Sistema de cooperação homem-robô com rejeição à colisões por processamento digital de imagens	20
2.2.4 Sistemas de cooperação homem-robô com ajuste dinâmico da impedância mecânica do robô para garantia da estabilidade de operação	21
2.2.5 Sistemas de cooperação homem-robô através de exoesqueletos	23

2.2.6	Sistemas de cooperação homem-robô com interação exclusiva pelos objetos deslocados	26
2.3	Conclusões	32
3	Especificação dos elementos de potência do veículo	35
3.1	Metodologia para levantamento de trajetórias mecânicas e forças externas aplicadas ao Vecarr	36
3.1.1	Sistema de aquisição de dados	36
3.2	Especificação do motor elétrico	41
3.2.1	Avaliação dos critérios de conjugado médio quadrático e potência média quadrática para especificação da máquina de indução adequada ao Vecarr	41
3.2.2	Critérios para o dimensionamento da máquina de indução adequada ao Vecarr	44
3.2.3	Estimativa dos parâmetros dos circuitos elétricos equivalente das máquinas de indução propostas para o Vecarr.	45
3.2.4	Avaliação do máximo conjugado disponibilizado pelas máquinas candidatas frente ao máximo nível de conjugado demandado na aplicação	49
3.2.5	Avaliação da região de linearidade entre corrente de estator e conjugado para cada um das máquinas candidatas ao acionamento do Vecarr	51
3.2.6	Avaliação da temperatura alcançada pelas máquinas candidatas ao acionamento do Vecarr durante as jornadas monitoradas	52
3.3	Especificação do banco de baterias	66
3.4	Especificação da transmissão mecânica	79
3.5	Conclusões	81
4	Projeto do Sistema de Controle	85
4.1	Modelo dinâmico do Vecarr	86
4.2	1ª Proposta de Controle: ajuste do sistema para estabelecimento da impedância mecânica equivalente com o objetivo de melhoria da sensação de contato na cooperação homem-robô	100
4.2.1	Desenvolvimento da estrutura de controle para emulação de impedância mecânica amigável ao ser humano	102
4.2.2	Ajuste dos ganhos da malha de controle para operação do Vecarr emulando impedância mecânica amigável ao ser humano	107

4.2.3	Simulação do sistema de controle para operação com emulação da impedância dinâmica mecânica desejada no contato com o usuário	110
4.3	2ª proposta de controle: regulação de esforço constante aplicado pelo condutor .	115
4.3.1	Caracterização do sinal de velocidade das pernas de seres humanos em movimentos acelerados	120
4.3.2	Caracterização do sinal de força imposto por seres humanos com intenção de deslocamento de um veículo de carga	121
4.3.3	Sintonia dos ganhos dos compensadores	125
4.3.4	Simulação do sistema de controle operando com regulação de força constante	130
4.4	Conclusões	136
5	Considerações tecnológicas do Vecarr	139
5.1	Estrutura geral do <i>firmware</i> de controle	140
5.2	Inversor de frequência	140
5.3	Plataforma microprocessada baseada à DSP de ponto fixo da família TMS320LF2812	142
5.4	Unidade de condicionamento para interface de sinais	146
5.5	Soluções para atenuação dos ruídos no Vecarr	149
5.6	Unidade de sensoriamento	154
5.7	Correlação entre os ganhos dos compensadores no sistema internacional de unidades para os ganhos em pu no <i>software</i> do DSP	156
5.8	Transdução do comando de corrente de conjugado do DSP para o conjugado eletromagnético real	159
5.9	Conclusões	160
6	Avaliação de Desempenho do Vecarr	163
6.1	Definição dos sentidos de deslocamento impostos para avaliação de desempenho do Vecarr	163
6.2	Avaliação de desempenho do Vecarr para controle por emulação de impedância mecânica amigável à cooperação com seres humanos	167
6.2.1	Avaliação de desempenho do Vecarr para deslocamentos em superfícies não inclinadas	167
6.2.2	Avaliação de desempenho do Vecarr para deslocamentos em superfícies inclinadas	171

6.2.3	Avaliação de desempenho do Vecarr para comandos bruscos de reversão .	177
6.3	Avaliação de desempenho do Vecarr para operação com regulação de força constante	179
6.3.1	Avaliação de desempenho do Vecarr para deslocamentos em superfícies não inclinadas	181
6.3.2	Avaliação de desempenho do Vecarr para deslocamentos em superfícies inclinadas	183
6.3.3	Avaliação de desempenho do Vecarr para comandos bruscos de reversão .	190
6.4	Conclusões	192
7	Conclusões e propostas para trabalhos futuros	195
8	Apêndices	209
8.1	Apêndice A. Artigo publicado na revista <i>Journal of Control, Automation and Electrical Systems</i> - " <i>Methodology for Specification of Three-Phase Induction Motors Applied to Drive Vehicles Used by Collectors of Recyclable Materials</i> " .	210
8.2	Apêndice B. Artigo publicado no congresso IEEE ICCVE2013 - <i>International Congress on Connected Vehicles 2013</i> - " <i>Human-Robot Cooperation System with Mechanical Impedance Control for Friendly Human Perception</i> "	223
8.3	Apêndice C. Artigo publicado no SBAI 2011 - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - " <i>Metodologia para Especificação de Motores de Indução Trifásicos para Tração de Veículos Utilizados por Catadores de Resíduos Recicláveis</i> "	226
8.4	Apêndice D. Artigo aceito para publicação no IEEE ITEC 2014 - <i>Components, Systems, and Power Electronics - from Technology to Business and Public Policy</i> - " <i>Design and Implementation of a Cost Effective Human-Robot Cooperation System to Aid in Load Translational Displacements</i> "	233

Lista de símbolos

- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_n$: fatores de multiplicação de força de cada um dos "n" robôs em um sistema multi-robô.
- Vecarr: Veículo elétrico para carregamento ;
- i_{sq}, i_{sd} : Correntes de estator em eixo q e d, respectivamente;
- T_h, T_b, T_g, T_e : Conjugados desenvolvidos no eixo do acionamento pelo condutor, atrito, gravidade e sistema eletromagnético, respectivamente;
- ψ_{carga} : atitude de arfagem do veículo;
- ψ : atitude de arfagem da roda;
- θ : atitude de guinagem do veículo;
- x, y, z : posições x, y e z do centro de massa do veículo com relação ao referencial inercial de estudo;
- M, b e V : matrizes de massas gereneralizada, elementos viscosos e forças conservativas, respectivamente;
- $\vec{\tau}$: vetor de forças generalizadas do veículo;
- \vec{q} : vetor de configurações do veículo;
- a^* : aceleração de referência da impedância mecânica amigável;
- a_{roda} : aceleração do conjunto eixo, roda e pneu do Vecarr;
- a_{carga} : aceleração do conjunto chassis e carga útil do Vecarr;
- a_z : aceleração do veículo na direção z ou na direção do centro da Terra;
- A_1, A_2, A_3 : coeficientes do denominador do filtro digital de 2_a ordem;

- B_1, B_2, B_3 : coeficientes do numerador do filtro digital de 2_a ordem;
- $C_{dif_{carga}}, C_{dif_{des}}$: capacitâncias equivalentes de carga e descarga, respectivamente, para a região de difusão da bateria;
- $C_{dL_{carga}}, C_{dL_{des}}$: capacitâncias equivalentes de carga e descarga, respectivamente, para a região de camada dupla da bateria;
- $C_{mt_{des}}$: capacitância equivalentes de descarga para a região de transferência de massa da bateria;
- $c_{especifico,Fe}$: calor específico do Ferro;
- $C_{termica}$: capacitância térmica da máquina de indução;
- Δi_{sq} : variação da corrente de estator em eixo q;
- Δaz : variação da aceleração do veículo na direção z ou na direção do centro da Terra;
- δI_{bat} : amplitude da corrente de pequeno sinal da bateria;
- δV_{bat} : amplitude da tensão de pequeno sinal da bateria;
- $\delta x_{repouso}$: distância entre os centros de massa do chassi e eixo da roda do Vecarr quando o sistema está em repouso;
- $\delta x_{repouso,cell}$: distância entre a barra de comando e o chassi do Vecarr quando não há deformação na célula de carga;
- F : sinal de força humana condicionado e disponível na entrada analógica do DSP;
- F_a : força de atrito entre o pneu e o solo na roda tracionada;
- F_{A1} : força de atrito entre o pneu e o solo na roda não tracionada;
- F_c : força de contrato entre o eixo e o mancal do Vecarr;
- $F_{ClulaDeCarga}$: sinal de força humana medido pela célula de carga;
- F_{ext} : força desenvolvida pelo ambiente externo;
- $F_{gravidade,carga}$: força da gravidade sobre o conjunto chassi e carga útil do Vecarr;
- F_h : força efetiva desenvolvida pelo ser humano que conduz o Vecarr;

- F_L : força efetiva da carga externa sobre um exoesqueleto;
- F_N : força normal atuando sobre a roda não tracionada;
- $F_{robo1}, F_{robo2}, F_{robon}$: forças efetivas desenvolvidas pelos "n" robôs que atuam em um sistema de cooperação multi-robô;
- g : aceleração da gravidade;
- G_a : ganho do atuador em um atuador mecatrônico de um exoesqueleto;
- G_{amb} : função de ganho do ambiente a qual relaciona as configurações impostas pelo mesmo com suas forças efetivas;
- G_{at} : função de ganho do atuador a qual relaciona as configurações impostas pelo mesmo com suas forças efetivas ;
- G_F : ganho entre os comandos de posicionamento do cérebro humano e a sua força muscular;
- G_h : função de ganho do ser humano a qual relaciona as configurações impostas pelo mesmo com suas forças efetivas ;
- H_1 : função dos ganhos de sensores e controladores que monitoram e regulam o efeito da força humana em um sistema de cooperação homem-robô ;
- H_2 : função dos ganhos de sensores e controladores que monitoram e regulam o efeito do ambiente externo em um sistema de cooperação homem-robô ;
- $i_{Fe}, i_M, i_r, i_s, i_x$: correntes na máquina de indução circulando, respectivamente, na resistência de perdas no Ferro, na indutância de magnetização, no rotor, nos terminais de estator e na indutância de dispersão do estator;
- i_{sa}, i_{sb} e i_{sc} : correntes nas fases A, B e C de estator;
- i_{sd}, i_{sd}^* e $i_{sd,nom}$: respectivos valores real, de referência e nominal para a corrente de estator em eixo d;
- i_{sq}, i_{sq}^* : respectivos valores real e de referência para a corrente de estator em eixo q;
- i_{sq}^*PWM : referência da corrente de estator em eixo q aplicada como sinal modulante na saída PWM do DSP;

- $i_{s,Max}$: máxima corrente de estator suportada pela máquina de indução;
- $i_{s,vazio}$: corrente de estator da máquina de indução a vazio;
- $i_{termica}$: corrente eficaz em um ciclo de variável da máquina de indução;
- J : momento de inércia do eixo, pneu e roda do Vecarr;
- J_{motor} , $J_{poliaMaior}$, $J_{poliaMenor}$: momentos de inércia do rotor do motor, da polia maior do sistema de transmissão e da polia menor do sistema de transmissão;
- J_{θ} : momento de inércia do veículo para guinagens;
- K_c : função de sensoriamento entre as configurações do ser humano e do exoesqueleto;
- k_{cell} : constante elástica da célula de carga;
- $K_{contato}$: constante elástica no contato do mancal com o eixo da roda do Vecarr;
- k_{dF} , k_{pF} e k_{iF} : ganhos derivativo, proporcional e integral aplicados ao regulador de força humana;
- k_{iIsd} e k_{pIsd} : ganhos proporcional e integral da malha para regulação da corrente de estator em eixo d;
- k_{iIsq} e k_{pIsq} : ganhos proporcional e integral da malha para regulação da corrente de estator em eixo q;
- $k_{p\omega}$ e $k_{i\omega}$: ganhos proporcional e integral da malha para regulação de velocidade;
- K_{Te} e \hat{K}_{Te} : valores real e estimado para a constante de conjugado eletromagnético da máquina de indução;
- L_{Lr} , L_{Ls} : indutâncias de dispersão do rotor e estator da máquina de indução;
- L_s , \hat{L}_s : valores real e estimado para a indutância de estator;
- M : indutância mútua da máquina de indução;
- $M_{alteres}$: massa dos alteres utilizados para caracterização do conjugado Coulombiano estático do Vecarr;
- M_{carga} : massa do conjunto chassis e carga útil do Vecarr;

- M_{motor} : massa da máquina de indução;
- $M(q,\dot{q})\cdot\ddot{q}$, $b(q,\dot{q})\cdot\dot{q}$, $k(q,\dot{q})$: matrizes de termos inerciais, viscosos e potenciais do modelo da carga útil deslocada em um sistema de cooperação homem-robô;
- M_e , b_e e k_e : matrizes de termos inerciais, viscosos e potenciais do modelo do exoesqueleto;
- M_{eq} , b_{eq} e k_{eq} : massa, coeficiente de atrito viscoso e coeficiente elástico de uma impedância mecânica amigável;
- M_h , b_h e k_h : matrizes de termos inerciais, viscosos e potenciais do corpo de um ser humano;
- M_{roda} : massa do conjunto eixo, roda e pneu do Vecarr;
- n_{transm} : relação de transmissão da redutora do veículo;
- ω e ω^* : velocidades angulares real e de referência do acionamento no eixo da roda;
- ω_e : frequência de alimentação do acionamento elétrico;
- ω_{motor} : velocidade angular real do acionamento no eixo do motor;
- ω_r : velocidade angular do acionamento referido aos terminais elétricos da máquina de indução;
- ω_{ref} : velocidade angular de referência do acionamento;
- $P_{carga}(t)$: potência instantânea demandada pela carga;
- P_{perdas} : potência de perdas da máquina de indução;
- $P_{perdas,max}$: máxima potência de perdas suportada pela máquina de indução;
- P_{rms} : potência eficaz demandada pela carga em um ciclo de operação;
- ψ_{carga} : ângulo de arfagem do veículo;
- \vec{q}_{B2} : vetor de configurações do Vecarr no seu próprio referencial;
- \vec{q}_S : vetor de configurações do Vecarr no referencial inercial;
- R^T : matriz de rotação tranposta;

- $R_{dif_{carga}}$, $R_{dif_{des}}$: resistências equivalentes de carga e descarga, respectivamente, para a região de difusão da bateria;
- $R_{dL_{carga}}$, $R_{dL_{des}}$: resistências equivalentes de carga e descarga, respectivamente, para a região de camada dupla da bateria;
- Re_{carga} , Re_{des} : resistências equivalentes de carga e descarga, respectivamente, para a região de contato eletrodo-eletrólito na bateria;
- $R_{mt_{des}}$: resistência equivalente de descarga para a região de transferência de massa da bateria;
- r_{Fe} , r_r : resistências de perdas no Ferro e do rotor da máquina de indução;
- r_s , \hat{r}_s : respectivos valores real e estimativa para a resistência de estator da máquina de indução;
- r_{roda} : raio do conjunto roda-pneu de tração;
- $R_{termica}$: resistência térmica da máquina de indução;
- s : escorregamento da máquina de indução;
- s_1, s_2, s_3 : comandos para os braços das fases A, B e C do inversor trifásico;
- σ :
- S_h : função de sensibilidade entre as configurações do corpo e a sua força efetiva sobre o ser humano;
- S_{amb} : função de sensibilidade entre as configurações do corpo e a sua força efetiva sobre o ambiente;
- s_{polo1} : pólo de maior valor absoluto aplicado à 1_a estratégia de controle do Vecarr;
- s_{polo2} : pólo de menor valor absoluto aplicado à 1_a estratégia de controle do Vecarr;
- u_h : força muscular desenvolvida pelo ser humano;
- T_0 : período de um ciclo de carga;
- $T_{ambiente}$: temperatura ambiente;

- $\tau_c, \tau_Z, \tau_{ref}, \tau_L, \tau_a$: forças efetivas desenvolvidas em um sistema de cooperação homem-exoesqueleto e respectivamente aplicadas pela pessoa, pelo compensador que regula a força da pessoa, pelo compensador que regula a ação do ambiente externo, pelo sistema de controle completo e pelo atuador;
- τ_R : constante de tempo do rotor;
- T_{atrito} : conjugado de atrito entre o pneu do Vecarr e o solo;
- T_b : conjugado de atrito viscoso do mancal do Vecarr;
- T_e : conjugado eletromagnético;
- $T_{e,motor}$: conjugado eletromagnético de referência do motor;
- $T_{e,rms}$: conjugado eletromagnético eficaz desenvolvido por uma máquina elétrica;
- $T_{estatico}$: conjugado de atrito Coulombiano estático do sistema de mancais do Vecarr;
- θ : ângulo de guinagem do Vecarr;
- $\theta_d, \dot{d}, \ddot{d}$: posição, velocidade e aceleração de referência desenvolvidos pelo cérebro humano para cooperação com um exoesqueleto;
- θ_h : configurações do corpo humano em um sistema de cooperação com exoesqueleto;
- θ_e : configurações do exoesqueleto em um sistema de cooperação com ser humano;
- T_{max} : máxima temperatura suportada pela máquina de indução;
- T_{motor} : temperatura da máquina elétrica;
- v^* : velocidade de referência da impedância mecânica amigável;
- V_{bat} : tensão da bateria;
- $V_{bat_{oc}}$: tensão de circuito aberto da bateria;
- v_{Fe}, v_M, v_S : tensões medidas, respectivamente, entre os terminais da resistência de perdas no Ferro, na indutância de magnetização e no estator da máquina de indução;
- v_{sd}, v_{sq} : tensões de estator em eixos d e q, respectivamente;
- $v_{veiculo}$: velocidade do centro de massa do Vecarr;

- w : sinal do encoder condicionado e aplicado às entradas QEP do DSP;
- x^* : posição de referência da impedância mecânica amigável;
- x_{carga} : posição do centro de massa do conjunto carga útil e chassis do Vecarr;
- x_{roda} : posição do centro de massa do eixo da roda do Vecarr;
- x_s : eixo x do referencial inercial;
- $x_{veiculo}$: posição do centro de massa do Vecarr;
- y_s : eixo y do referencial inercial;
- z_s : eixo z do referencial inercial;
- Z : função de sensoriamento e regulação da força humana desenvolvidos pelo sistema mecatrônico em um exoesqueleto;
- Z_{arc1}, Z_{arc2} : impedância em arco da bateria para regiões de baixa e alta frequência, respectivamente;
- $Z(I_{bat})$: impedância de pequeno sinal da bateria;

Lista de Figuras

2.1	Sistema de direção elétrica reproduzido de Zhang <i>et al</i> [36]	11
2.2	Contribuições do homem, do robô e da carga externa para o posicionamento de um ponto de controle em uma posição “x”.	17
2.3	Diagrama de blocos destacando as contribuições do homem, do robô e do ambiente externo para o posicionamento de um ponto de controle no sistema de cooperação homem-robô.	18
2.4	Compensação dinâmica do atrito viscoso equivalente do robô (b_r) para garantir a estabilidade do sistema de cooperação frente à variações na constante elástica do braço humano (K_h). Adaptado de Tsumugiwa <i>et al</i> [79]	22
2.5	Diagrama de blocos do sistema de cooperação homem-exoesqueleto.	23
2.6	Ilustração da topologia da perna exoesqueleto desenvolvida no MIT por Walsh [82].	25
2.7	Modelo da luva exoesqueleto produzida por Iqbal [39] para auxílio à tratamentos fisioterápicos. Reproduzida de Iqbal [39].	27
2.8	Foto e modelo do iCART aplicado para transporte cooperativo de carga através de múltiplos robôs. Desenvolvido e reproduzido de Kashiwazaki [43].	29
3.1	Arranjo de montagem da célula de carga ao veículo durante o monitoramento da rotina de catadores de papel.	37
3.2	Diagrama de blocos contendo a interface de sinais do sistema de aquisição de dados CEFADSu utilizado para aquisição de dados na rotina de catadores de papel.	39
3.3	Fotografia dos componentes eletrônicos embarcados para registro dos sinais de foça e trajetória dos catadores.	39
3.4	Fotografia GPS embarcado ao veículo dos catadores de papel.	40

3.5	Fotografia da barra de comandos e célula de carga embarcados ao veículo dos catadores de papel.	40
3.6	Ilustração do conjugado demandado em um ciclo de trabalho de uma aplicação genérica.	42
3.7	Circuito equivalente em regime permanente da máquina de indução trifásica.	43
3.8	Circuito simplificado para a máquina de indução maior que 10cv em regime permanente.	43
3.9	Conjugado eletromagnético x velocidade para tentativas de estimação das resistências de rotor do motor WEG alto rendimento 370W, 220V, 4 pólos.	46
3.10	Potência de estator x velocidade para as tentativas de estimativa da resistências de rotor do motor WEG alto rendimento 370W, 220V, 4 pólos.	47
3.11	Conjugado eletromagnético x velocidade para as tentativas de estimativa das indutâncias de dispersão do estator e rotor do motor WEG alto rendimento 370W, 220V, 4 pólos.	47
3.12	Fator de potência x velocidade para as tentativas de estimativa da indutância de magnetização do motor WEG alto rendimento 370W, 220V, 4 pólos.	48
3.13	Eficiência x velocidade para as tentativas de levantamento da resistência de perdas no ferro para o motor WEG alto rendimento 370W, 220V, 4 pólos.	48
3.14	Referência de conjugado eletromagnético x tempo para a máxima demanda de conjugado medida na rotina dos catadores de papel e considerando a redutora aplicável à máquinas de 4 pólos.	50
3.15	Referência de conjugado eletromagnético x tempo para a máxima demanda de conjugado medida na rotina dos catadores de papel e considerando a redutora aplicável à máquinas de 6 pólos.	50
3.16	Referência de conjugado eletromagnético x tempo para a máxima demanda de conjugado medida na rotina dos catadores de papel e considerando a redutora aplicável à máquinas de 8 pólos.	51
3.17	Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 370W, 220V, 4 pólos.	52
3.18	Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 370W, 220V, 6 pólos.	53
3.19	Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 370W, 220V, 8 pólos.	53

3.20	Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 550W, 220V, 4 pólos.	54
3.21	Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 550W, 220V, 6 pólos.	54
3.22	Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 550W, 220V, 8 pólos.	55
3.23	Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 750W, 220V, 4 pólos.	55
3.24	Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 750W, 220V, 6 pólos.	56
3.25	Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 750W, 220V, 8 pólos.	56
3.26	Circuito térmico equivalente para a máquina de indução.	57
3.27	Níveis máximos de corrente de estator x velocidade de operação para motores de indução trifásicos, auto-ventilados e com rotor em gaiola. Copiada do manual do usuário - inversor WEG CFW09.	59
3.28	Diagrama de blocos para simulação das máquinas elétricas candidatas à tração do Vecarr, considerando as demandas de força e velocidade reais medidas na rotina de trabalho dos catadores de papel.	63
3.29	Curva da máxima temperatura observada dentre todos os motores candidatos.	65
3.30	Soma da energia total consumida por cada motor candidato nas 9 rotinas de trabalho monitoradas nas ruas de São João del Rei.	67
3.31	Circuito elétrico equivalente da bateria. Todos os parâmetros passivos são não lineares.	70
3.32	Impedância equivalente de pequenos sinais para uma bateria chumbo ácido de 36[V], 27,5[A.h], com 70% de nível de carga, operando à temperatura de 25°C e correntes DC de descarga de 1,35 e 2,70[A]. Reproduzido de Buller [15].	71
3.33	Impedância equivalente de pequenos sinais para uma bateria chumbo ácido de 36[V], 27,5[A.h], com 70% de nível de carga, operando à temperatura de 27°C e diferentes níveis de correntes DC de descarga. Reproduzido de Buller [15].	71
3.34	Impedância equivalente de pequenos sinais para uma bateria chumbo ácido de 36[V], 27,5[A.h], com 70% de nível de carga, operando à temperatura de 27°C e diferentes níveis de correntes DC de carga. Reproduzido de Buller [15].	72

3.35	Impedância equivalente de pequenos sinais para uma bateria chumbo ácido de 36[V], 27,5[A.h], operando à temperatura de 27°C, com corrente de descarga igual a 1,35[A] e diferentes níveis de estado de carga. Reproduzido de Buller [15].	72
3.36	Impedância equivalente de pequenos sinais para uma bateria chumbo ácido de 36[V], 27,5[A.h], operando à temperatura de 27°C, com corrente de carga igual a 1,35[A] e diferentes níveis de estado de carga. Reproduzido de Buller [15].	73
3.37	Impedância equivalente de pequenos sinais para uma bateria chumbo ácido de 36[V], 27,5[A.h], operando à corrente DC de carga igual a 1,35[A], e com diferentes temperaturas de operação. Reproduzido de Buller [15].	73
3.38	Circuito equivalente simplificado da bateria, onde as impedâncias são representadas por associações RC com resistência variável com a frequência.	74
3.39	Estratégia para avaliação do percentual de descarga da bateria baseado na corrente em seus terminais, na duração dessas correntes e nas tabelas de fabricantes.	77
3.40	Nível de descarga de cada uma das 13 baterias avaliadas e aplicadas ao 1º trajeto monitorado nas ruas. Duração do trajeto: 12500 segundos.	77
3.41	Nível de descarga de cada uma das 13 baterias avaliadas e aplicadas ao 2º trajeto monitorado nas ruas. Duração do trajeto: 1223 segundos.	78
3.42	Nível de descarga de cada uma das 13 baterias avaliadas e aplicadas ao 3º trajeto monitorado nas ruas. Duração do trajeto: 5145 segundos.	78
3.43	Nível de descarga de cada uma das 13 baterias avaliadas e aplicadas ao 4º trajeto monitorado nas ruas. Duração do trajeto: 5729 segundos.	79
3.44	Eficiência x escorregamento para diferentes frequências síncronas e razão V/f constante.	80
3.45	Percentual do tempo total de deslocamento gasto em algumas faixas de velocidades de translação.	81
4.1	Configurações do centro de massa do chassis/carga útil.	87
4.2	Configuração de guinagem do chassis/carga útil.	88
4.3	Configuração de arfagem chassis/carga útil.	88
4.4	Diagrama de corpo livre destacando as forças efetivas que agem sobre as dinâmicas de arfagem do eixo de tração e de translação do chassis/carga útil.	90
4.5	Diagrama de blocos do modelo de impedâncias do eixo de tração/rodas e do chassis/carga útil.	94

4.6	Diagrama de blocos do modelo de impedâncias do eixo de tração/rodas e do chassis/carga útil destacando a dinâmica do chassis/carga útil.	94
4.7	Diagrama de blocos do modelo de impedâncias do eixo de tração/rodas e do chassis/carga útil, obtido considerando-se o alto valor da constante elástica de contato entre esses corpos.	95
4.8	Vista do Vecarr modelado em SolidWorks.	97
4.9	Vista do Vecarr modelado em SolidWorks.	97
4.10	Vista do Vecarr modelado em Solid Works.	98
4.11	Ilustração do experimento realizado para levantamento do conjugado de atrito estático do Vecarr.	99
4.12	Sistema massa-mola-amortecedor genérico e que pode representar a dinâmica de corpos no espaço.	101
4.13	Impedância mecânica equivalente percebida pelo condutor durante a cooperação com o Vecarr.	104
4.14	Controlador proposto para que o Vecarr emule um sistema massa-mola-amortecedor com impedância mecânica equivalente caracterizada pelos parâmetros “ M_{eq} ”, “ b_{eq} ” e “ k_{eq} ”.	106
4.15	Lugar do pólo de menor valor absoluto para massa variando de 43 a 500kg. . .	109
4.16	Lugar do pólo de maior valor absoluto para massa variando de 43 a 500kg. . .	110
4.17	Força desenvolvida pelo usuário no contato com o Vecarr.	111
4.18	Velocidade desenvolvida pelo veículo para operação emulando uma impedância mecânica de referência.	111
4.19	Erro no rastreamento de velocidade para operação emulando uma impedância mecânica de referência.	112
4.20	Força consumida pela mola virtual do sistema de geração de referências aplicado ao Vecarr operando com emulação de impedância mecânica.	112
4.21	Força consumida pelo amortecedor virtual do sistema de geração de referências aplicado ao Vecarr operando com emulação de impedância mecânica.	113
4.22	Resposta em frequência da impedância mecânica de referência contendo $M = 3[\text{kg}]$, $b = 50[\text{N}/(\text{m}/\text{s})]$ e $k = 30[\text{N}]$	114
4.23	Estrutura completa de controle destacando as malhas para controle de força e de velocidade, as quais operam, respectivamente, quando o veículo está em movimento ou parado.	118

4.24	Sinal de velocidade desenvolvido por um catador de papel durante a tração não motorizada de seu veículo.	120
4.25	Sinal de força imposto por uma pessoa com intenção de frear o Vecarr quando o mesmo já se encontrava em movimento.	122
4.26	Sinal de força imposto por uma pessoa com intenção de acelerar o Vecarr quando o mesmo já se encontrava em movimento.	123
4.27	Sinal de força imposto por uma pessoa com intenção de frear o Vecarr quando o mesmo já se encontrava em movimento.	123
4.28	Aproximação proposta ao sinal de força como polinômio de 1ª ordem com valor máximo limitado.	124
4.29	Resposta em frequência para o denominador da função de transferência com alocação de pólos em frequências separadas de uma década.	127
4.30	Velocidade desenvolvida pelo veículo para deslocamento em ritmo de caminhada.	132
4.31	Posição do condutor para deslocamento em ritmo de caminhada.	132
4.32	Posição do veículo para deslocamento em ritmo de caminhada.	133
4.33	Força humana aplicada ao veículo para deslocamento em ritmo de corrida.	134
4.34	Velocidade desenvolvida pelo veículo para deslocamento em ritmo de corrida.	134
4.35	Posição do condutor para deslocamento em ritmo de corrida.	135
4.36	Posição do veículo para deslocamento em ritmo de corrida.	135
5.1	Estrutura geral destacando a interface de sinais entre os 4 principais sistemas de <i>firmware</i> do Vecarr.	140
5.2	Fluxograma do <i>software</i> de controle implementado na plataforma DSP. A sequência de eventos é executada a cada interrupção de <i>hardware</i> gerada pela unidade de geração de PWM.	143
5.3	Estrutura de cada seção de 2ª ordem utilizada na implementação dos filtros digitais.	145
5.4	Diagrama de interface entre o DSP e o inversor, destacando o condicionamento do sinal de referência da corrente de conjugado.	146
5.5	Diagrama de interface entre a célula de carga e o DSP.	146
5.6	Fotografia dos sistemas microprocessado, de condicionamento e inversor de frequência.	148
5.7	Fotografia das placas eletrônicas com destaque aos conectores utilizados no <i>hardware</i> do Vecarr para mitigar problemas de mau contato pelas vibrações mecânicas.	149

5.8	Alguns caminhos para o ruído conduzido de modo comum.	151
5.9	Aterramento dos envólucros de papel alumínio dos cabos de alimentação e da célula de carga ao dissipador do inversor.	152
5.10	Montagem da célula de carga para operação com o Vecarr.	155
5.11	Exemplo de cálculo para correlação entre o ganho proporcional em unidades do DSP para as unidades do sistema internacional.	158
6.1	Caracterização do movimento em superfície não inclinada e sentido frontal. . . .	164
6.2	Caracterização do movimento em superfície não inclinada e sentido reverso. . . .	164
6.3	Caracterização do movimento em aclave e sentido frontal.	165
6.4	Caracterização do movimento em aclave e sentido reverso.	165
6.5	Caracterização do movimento em declive e sentido frontal.	166
6.6	Caracterização do movimento em declive e sentido reverso.	166
6.7	Erro, referência e valor real de velocidade do veículo para deslocamento frontal e no plano.	168
6.8	Força humana demandada com acionamento habilitado e desabilitado em deslocamento frontal e no plano.	168
6.9	Erro, referência e valor real de velocidade do veículo para deslocamento reverso e no plano.	170
6.10	Força humana demandada com acionamento habilitado e desabilitado em deslocamento reverso e no plano.	170
6.11	Erro, referência e valor real de velocidade do veículo para deslocamento frontal e em subida.	171
6.12	Força humana demandada com acionamento habilitado e desabilitado em deslocamento frontal e em subida.	171
6.13	Erro, referência e valor real de velocidade do veículo para deslocamento reverso e na descida.	173
6.14	Força humana demandada com acionamento habilitado e desabilitado em deslocamento reverso e na descida.	173
6.15	Erro, referência e valor real de velocidade do veículo para deslocamento reverso e na subida.	175
6.16	Força humana demandada com acionamento habilitado e desabilitado em deslocamento reverso e na subida.	175

6.17	Erro, referência e valor real de velocidade do veículo para deslocamento frontal e na descida.	176
6.18	Força humana demandada com acionamento habilitado e desabilitado em deslocamento frontal e na descida.	177
6.19	Erro, referência e valor real de velocidade do veículo para exercícios de reversão brusca no plano.	178
6.20	Força humana e posição do Vecarr para exercícios de reversão brusca no plano.	178
6.21	Estrutura completa do sistema para regulador de força constante.	180
6.22	Erro de força do Vecarr para deslocamento frontal e no plano.	181
6.23	Velocidade para deslocamento frontal e no plano.	181
6.24	Erro de força do Vecarr para deslocamento reverso e no plano.	182
6.25	Velocidade para deslocamento reverso e no plano.	183
6.26	Erro de força do Vecarr para deslocamento frontal em aclave.	184
6.27	Velocidade para deslocamento frontal em aclave.	184
6.28	Potência desenvolvida pelo condutor para deslocamento frontal em aclave.	184
6.29	Energia consumida do condutor para deslocamento frontal em aclave.	185
6.30	Altitude desenvolvida pelo veículo a partir do ponto inicial do movimento para deslocamento frontal em aclave.	185
6.31	Erro de força do Vecarr para deslocamento reverso e em declive.	186
6.32	Velocidade para deslocamento reverso e em declive.	187
6.33	Erro de força do Vecarr para deslocamento reverso e em aclave.	187
6.34	Velocidade para deslocamento reverso e em aclave.	188
6.35	Erro de força do Vecarr para deslocamento frontal e em declive.	188
6.36	Velocidade para deslocamento frontal e em declive.	188
6.37	Potência consumida do condutor para deslocamento frontal e em declive.	189
6.38	Energia consumida do condutor para deslocamento frontal e em declive.	189
6.39	Posição do veículo para deslocamento frontal e em declive.	189
6.40	Altitude para deslocamento frontal e em declive.	190
6.41	Posição e força humana para reversões bruscas com regulação de força constante.	191
6.42	Velocidade para reversões bruscas com regulação de força constante.	191

Lista de Tabelas

3.1	Faixas típicas dos parâmetros do circuito equivalente para máquinas de indução de grande porte (potência nominal maior que 10cv).	42
3.2	Correlação entre os parâmetros do circuito equivalente da máquina e as grandezas mais sensíveis ao mesmos.	45
3.3	Parâmetros dos circuitos equivalentes para os motores WEG alto rendimento de 370W, 550W e 750W, contendo 4, 6 e 8 pólos. Todos motores possuem tensão nominal de 220Vrms.	49
3.4	Corrente de magnetização dos motores candidatos ao acionamento do Vecarr para operação na região de conjugado constante. Todos os motores listados são da família WEG alto rendimento, com alimentação nominal em 220V, 60Hz. . .	61
3.5	Resistências térmicas para os 3 pontos parametrizáveis na curva de proteção do inversor de frequência e contemplando todos os motores candidatos à tração do Vecarr.	62
3.6	Sintonia dos compensadores utilizados para simular o desempenho de acionamentos elétricos para realizar as mesmas rotinas de trabalho dos catadores . . .	65
3.7	Tabela com as correntes contínuas de descarga e os respectivos tempos de descarga para a bateria Haze 12[V]/5[A.h] atingir a tensão final de 10,5[V] a partir da tensão inicial de 12[V].	76
3.8	Elementos de potência especificados para tracionar a aplicação dos catadores de papel de São João del Rei.	82
4.1	Tabela contendo os parâmetros de impedância mecânica para o Vecarr. Os parâmetros foram obtidos por medição, catálogos e modelagem em Solid Works.	96
4.2	Tabela contendo o conjugado de atrito no mancal do Vecarr em função da velocidade.	100

4.3	Tabela contendo as diferentes impedâncias mecânicas equivalentes para as quais os participantes da pesquisa de Ben-Lamine <i>et al</i> [9] julgaram que o sistema mecânico é simultaneamente tranquilizante, flexível, agradável e com respostas típicas de humanos.	103
4.4	Tabela contendo os pólos do sistema de controle apresentado na Figura 4.14 para os compensadores sintonizados como sendo $k_{p\omega} = 4 \text{ A}/(\text{rad/s})$ e $k_{i\omega} = 65 \text{ A}/\text{rad}$.	109
4.5	Forças máxima média e tempo médio para alcance dessa força máxima avaliado para um grupo de 108 pessoas que aplicaram intenções de movimento ao Vecarr.	124
4.6	Tabela contendo os pólos do sistema de controle apresentado na Figura 4.23 para os compensadores sintonizados como sendo $k_{df} = -2,8419 \times 10^{-4} [\text{A.s}/\text{N}]$, $k_{pf} = -2,8543 \times 10^{-4} [\text{A}/\text{n}]$ e $k_{if} = -2,6901 \times 10^{-5} [\text{A}/(\text{N.s})]$	129
5.1	Coefficientes dos filtros digitais aplicados às medições de força e velocidade. Esse filtro é do tipo Butterworth, passa-baixas, 8ª ordem, banda passante igual a 5Hz, frequência da banda de transição igual a 20Hz, atenuação de 1dB na frequência de corte e de 80dB no final da banda de transição.	145
5.2	Dados obtidos para ensaio de correlação $i_{sq}^* \times T_e$	157
5.3	Parâmetros do circuito equivalente para motor WEG Alto Rendimento 1,5cv, 220V, 4,43A, 1715rpm, 79,5%, fp 0,82.	159
5.4	Dados obtidos para ensaio de correlação $i_{sq}^* \times T_e$	160
6.1	Comparação de desempenho dos controladores para ensaios de rejeição de acidentes (reversões bruscas).	193
6.2	Comparação de desempenho dos controladores para ensaios de rejeição de acidentes (reversões bruscas).	193

Capítulo 1

Introdução

1.1 Apresentação

Diversas atividades profissionais no estado de Minas Gerais e no Brasil demandam o deslocamento de cargas por veículos tracionados por seres humanos. Essas atividades, tais como a construção civil, a agropecuária e a coleta de materiais para reciclagem, empregam uma parcela significativa da mão de obra economicamente ativa do país e os trabalhadores envolvidos deslocam cargas da ordem de centenas de quilogramas diariamente.

Este tipo de trabalho, apesar de abundante e de baixo grau de exigência quanto à formação escolar, expõe um grande número de trabalhadores a desgastes e lesões de origem músculo-esqueléticas. Mediante aos problemas de saúde provocados por tais atividades e à contribuição prestada pelos seus profissionais à sociedade, faz-se necessário um sistema que os auxilie no deslocamento das cargas. Adicionalmente, pessoas fisicamente debilitadas se beneficiariam desse tipo de sistema em suas atividades diárias.

Pautado nesses argumentos, a presente tese de doutorado propõe o projeto e a construção de um veículo elétrico cujo sistema de tração seja totalmente concentrado em uma base mecânica, a qual possa ser prontamente adaptada às carrocerias demandadas em diferentes atividades profissionais, e que também opere sob a detecção da intenção de movimento do condutor, de tal forma que seja preservada a maneira intuitiva de condução dos veículos já usados por profissionais em atividades de deslocamento de cargas. Uma vez demonstrados os conceitos alvo desse projeto, há a possibilidade de extrapolar sua aplicação ao projeto de veículos que auxiliem nas atividades cotidianas de natureza não-profissional, tal como o transporte de pertences de crianças e idosos.

1.2 Relevância

No Brasil, as atividades que demandam o deslocamento de cargas por tração humana envolvem um grande número de trabalhadores. Dentre tais atividades, destacam-se a construção civil, a coleta de materiais para reciclagem e o trabalho rural, os quais empregam, respectivamente, cerca de 6,4% [73], 1% [51] e 21,1% [64] da população economicamente ativa do país.

No desenvolvimento dessas atividades, há intenso deslocamento de cargas, a qual ocorre por içamento com braço humano ou através de veículos que são tracionados por seres humanos. No contexto da construção civil a função que abriga o maior número de trabalhadores é a de servente de pedreiro, a qual exige o deslocamento de sacos de cimento com 50kg; carrinhos de mão contendo areia e brita contendo massas típicas de dezenas de quilogramas; bem como o transporte de peças de madeira, de latas de concreto e de latas de massa de cimento, as quais possuem massa típica da mesma ordem de grandeza. Dentro deste contexto, Amdt *et al* [3] registraram o aparecimento de problemas músculo-esqueléticos em 14,32% dos indivíduos presentes em uma população de 14.474 trabalhadores avaliados durante dez anos. Já na atividade de catadores de resíduos recicláveis, ou catadores de papel, são tracionados tipicamente 500kg de material por dia, durante 6 dias por semana, a fim de se garantir uma renda média de dois salários mínimos [51]. Nessa atividade Porto [66] avaliou o aparecimento de problemas osteoarticulares em 17,7% de 207 profissionais entrevistados. Já em atividades agrícolas, Pereira *et al* [64] avaliaram a presença de dores clinicamente detectáveis na coluna lombar em 50% dos transportadores de café da região de Ouro Fino, Minas Gerais.

Apesar dos problemas listados, a literatura científica não apresenta uma quantidade vasta de trabalhos destinados a auxiliar no deslocamento de carga desempenhados por estes profissionais. Uma contribuição científica aos problemas mencionados foi apresentada pelo projeto Recicar [81], no qual o Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG projetou e construiu um veículo com tração por motor à combustão e aplicado à atividade de catadores de papel de Belo Horizonte. O veículo foi entregue aos catadores, porém sua utilização foi abandonada devido às seguintes reclamações dos usuários: ausência de motor de arranque, o que dificulta o início de operação do motor; inalação dos gases de combustão; gastos excessivos de pneus devido à ausência de suspensão dedicada; presença de manetes de comando para aceleração, frenagem e troca de marchas, as quais impuseram um obstáculo operacional para a condução do veículo.

O apontamento de tais problemas sugerem condições de contorno aplicáveis a novos sistemas

para auxílio ao deslocamento de cargas, bem como oportunidades de desenvolvimento científico para sua mitigação. Além disso, a implementação de tais soluções seria relevante com base na grande quantidade de trabalhadores que desempenham atividades de tração, nos problemas de saúde decorrentes dessas atividades e no desejo por veículos que possam ser conduzidos de maneira intuitiva, de tal forma que pessoas com pouco treinamento pudessem usufruir do produto. Para atender a todas essas demandas, o presente trabalho apresenta uma metodologia de projeto e a construção de um veículo com tração à base de acionamento elétrico, com geração das referências de trajetória mecânica através da intenção de movimento dos seus condutores e considerando as demandas de uso de públicos específicos.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma solução para auxiliar pessoas na translação de cargas através de um veículo terrestre equipado com um acionamento elétrico, o qual se desloque com a velocidade imposta pelo seu condutor e que, para isso, não altere sua forma intuitiva de direção. Dentro desse objetivo geral, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- avaliação do estado da arte na tecnologia de cooperação homem-robô com foco na utilização harmônica da capacidade de potência da máquina em conjunto à capacidade de tomadas de decisão do cérebro humano;
- desenvolvimento de uma metodologia para especificação dos elementos de potência do veículo que seja pautada nas configurações mecânicas demandadas pelos condutores em cada ramo de atividade que se deseja utilizar o sistema. Dessa metodologia, devem ser obtidos os motores, bancos de baterias e sistemas de transmissão mais eficientes para uma dada demanda de carga e de trajetórias mecânicas;
- desenvolvimento de uma plataforma computacional otimizada para estudos de acionamentos elétricos cujas simulações contemplem jornadas de trabalho desenvolvidas em horas e cujas constantes de tempo sejam da ordem de micro segundos;
- avaliação do desempenho do sistema de tração sintetizado por acionamento elétrico baseado à máquina de indução. Tal opção faria o veículo acessível a uma maior faixa de usuários, uma vez que os sistemas atuais de cooperação homem-robô apresentados na literatura científica são todos pautados à servoacionamentos, e os mesmos são aproximadamente 5 vezes mais caros para a faixa típica de potências exigidas nas aplicações

avaliadas;

- modelagem do veículo e avaliação da mudança em seu comportamento dinâmico para operação com massa variável;
- avaliação dos perfis de utilização de diferentes usuários, e utilização de tais perfis como premissa à síntese das malhas de controle. Nesse objetivo específico, serão pesquisadas alternativas de controle que diferenciem o comportamento do veículo para as demandas de deslocamentos suaves, tais como aquelas desenvolvidas por idosos, crianças e profissionais de almoxarifados de produtos frágeis, do comportamento desejado por profissionais que desejam velocidades finais mais elevadas, tais como catadores de papel que se desloquem em ruas de intenso tráfego;

1.4 Contribuições

A presente tese de doutorado apresenta uma metodologia para a síntese de um veículo terrestre destinado a auxiliar pessoas no deslocamento de cargas. Dentro da metodologia proposta, são apresentados elementos que orientam na especificação dos elementos de potência do veículo, bem como na escolha de estruturas de controle que façam com que o veículo desempenhe suas trajetórias em harmonia com as demandas de diferentes públicos. Destaca-se também que, independentemente do ajuste do veículo para a demanda de um dado público, é preservada a maneira intuitiva de cooperação entre o ser humano e o veículo de carga. Assim sendo, a pessoa que utiliza o sistema é presenteada pela sensação de multiplicação de sua força sem a necessidade de treinamento específico para conduzir o veículo. Mediante tais características funcionais, destacam-se as seguintes contribuições específicas da solução para transporte de cargas desenvolvida na tese:

- capacidade de inserção no mercado de trabalho de pessoas incapazes de tracionar massas típicas de centenas de quilogramas;
- melhoria das condições de trabalho e saúde das pessoas que trabalham com tração humana de carga;
- aumento da capacidade de transporte e o conseqüente aumento de rentabilidade em atividades cujo fluxo de materiais conduzidos por pessoas seja diretamente ligado aos ganhos financeiros;

- melhoria nas condições de transporte de materiais escolares por crianças, rejeitando-se assim os prejuízos ortopédicos correlatos;
- auxílio ao transporte de pertences de idosos, também atenuando-se os prejuízos ortopédicos e a probabilidade de queda desses indivíduos. Ressalta-se que quedas são uma das maiores causas de óbito entre idosos e soluções que atenuem o problema são bem vindas;
- redução nos gastos públicos advindos dos benefícios de segurança social que são pagos por afastamento de profissionais com lesões músculo-esqueléticas causadas pelo transporte de cargas;
- apresentação de uma metodologia paramétrica às condições geográficas e de carga para especificação do sistema de potência otimizado à cada região que o veículo for empregado;
- aumento de produtividade em ambientes profissionais que demandam outras atividades aliadas ao transporte de carga, tal como a construção civil e as atividades agropecuárias. Tal aumento se dá pela redução do desgaste físico dos indivíduos na parcela de tempo que eles dedicam ao transporte de carga, restando assim mais energia para o desempenho das outras atividades;
- desenvolvimento de uma estrutura para a correta geração das referências de trajetória pautado na intenção de movimento do condutor;
- desenvolvimento de uma estrutura de *hardware* contendo sistemas eletrônicos de sinal e de potência que possa ser aplicada a outros veículos elétricos, demandando somente alterações de software e sensores;
- determinação das características do sistema de sensoriamento para aplicação de cooperação homem-robô através de contato mecânico;
- construção do veículo elétrico com separação entre a estrutura de tração e a caçamba de carga, de tal forma que outras aplicações e pesquisas possam ser atendidas pela mesma solução alterando-se somente a caçamba;
- desenvolvimento do software de controle de um robô que trabalhe em cooperação com o ser humano e que seja dotado de estruturas para filtragem, regulação de força, regulação de velocidade, medição de velocidade por pulsos de encoder, geração de referências de

trajetória mecânica, correção de offset de sensores e sistema anti wind-up de integradores. Todas essas unidades de software foram desenvolvidas em plataforma C++ e são prontamente executáveis em outras plataformas microprocessadas;

- apresentação do projeto de sintonia dos controladores para garantia de desempenho dinâmico do sistema sob as premissas de rastreamento de trajetória, rejeição de carga e segurança do condutor;
- apresentação detalhada do projeto de compatibilidade eletromagnética do veículo, de tal forma que outras plantas que demandem o uso de inversores de frequência integrado à circuitos de interface eletrônica tenham relação sinal-ruído aceitável dentro do contexto de suas aplicações;
- especificação, construção e caracterização do modo de operação do banco de baterias e do seu carregador através de um sistema de baixo custo e que permita o prolongamento de seu número de ciclos de carga e descarga;
- projeto e integração do banco de baterias a um inversor de frequências não-regenerativo de prateleira, de tal forma que se possa utilizar do seu resistor de pré-carga ao se ligar o sistema e utilizar da capacidade de regeneração de energia ao banco de baterias durante frenagens;

1.5 Organização do texto

O estudo é dividido em 6 capítulos.

O capítulo 2- Tecnologias para sistemas de cooperação homem-robô e para detecção da intenção de movimento de pessoas - apresenta uma vasta revisão bibliográfica sobre os trabalhos científicos mais recentes que contemplam os sistemas de cooperação homem-robô para deslocamento de cargas, bem como o estado da arte para detecção da intenção de movimento de pessoas que cooperam com tais veículos. No campo da detecção da intenção de movimento, são avaliadas aplicações de bioengenharia, robótica, veículos e de realidade virtual e, a partir do estudo das mesmas, foram identificados os sistemas e sensores que potencialmente poderiam ser aplicados ao Vecarr. No campo da cooperação homem-robô são apresentados sistemas multi-robôs que interagem com seres humanos através da carga a se deslocar, bem como exoesqueletos que interagem com as pessoas através de vestimentos que multiplicam o esforços de membros específicos de seu corpo. Da avaliação desses sistemas são extraídas informações relativas às

abordagens de controle aplicadas, aos sensores e as limitações operacionais. Tais informações são correlacionadas ao problema proposto na tese, donde se identifica o que utilizar do estado da arte de sistemas de cooperação, bem como se identifica a oportunidade de contribuição do presente trabalho.

O capítulo 3 - Especificação dos elementos de potência do veículo - apresenta uma metodologia para especificação do motor elétrico, transmissão mecânica e banco de baterias necessários para uma jornada de trabalho diária do Vecarr. Como cenário de aplicação para a metodologia, foi monitorada a rotina de catadores de papel da cidade de São João del Rei, Minas Gerais. Nesse monitoramento, foram registrados os sinais de configuração do veículo e de força aplicada pelos catadores. Utilizando essas informações, considerando a estrutura de controle típica que será aplicada pelo inversor de frequência ao veículo, e considerando os elementos que propiciem a máxima eficiência ao sistema, obtiveram-se os elementos de potência que são capazes de desempenhar o trabalho demandado na rotina dos catadores. Destaca-se que a metodologia apresentada é prontamente aplicável a outras atividades profissionais, é inovadora e também permite a estimação do conjugado de carga com um número reduzido de sensores e ensaios.

O capítulo 4 - Projeto dos sistemas de controle - Apresenta os detalhes para a síntese e sintonia de malhas de controle que propiciem o uso do Vecarr por usuários que possuam diferentes demandas e diferentes poderes aquisitivos. Sob essa perspectiva, são apresentadas duas estruturas de controle, as quais se diferenciam por atender às seguintes premissas: conforto no contato entre homem e veículo ou a capacidade de desenvolvimento de velocidades finais elevadas. Assim sendo, a 1^a estrutura de controle é dedicada a pessoas que necessitam ou prezem o conforto no contato com o veículo. Para implementá-la o sistema é sintonizado de tal forma que seu comportamento dinâmico torne a percepção do veículo pelo condutor como sendo uma estrutura massa-mola-amortecedor equivalente, a qual garanta a sensação de algo flexível, tranquilizante, confortável e de dinâmica similar à humana. Já a 2^a estrutura de controle é projetada para pessoas que demandam velocidades finais mais elevadas, mesmo em detrimento ao conforto percebido no contato com o veículo. Nesse modo de operação, o Vecarr é ajustado para que não exista um efeito amortecedor que exija forças crescentes do usuário para aumento de velocidade, e que ao mesmo tempo compatibilize a aceleração do veículo com aquela apreciadas nas pernas humanas, de tal forma que não ocorram acidentes. Para todas as estratégias mencionadas são apresentados os detalhes das estruturas para geração de referências de trajetória, os detalhes para sintonia dos compensadores, a modelagem do veículo e da dinâmica imposta pelos braços e pernas dos usuários que participam da cooperação com o

sistema, bem como uma vasta gama de exemplos de aplicação para cada estrutura de controle pesquisada.

O capítulo 5 - Considerações construtivas do Vecarr – apresenta os resultados das explorações científicas feitas para a construção do veículo. Tal capítulo se destina a apresentar de uma maneira agradável e completa os problemas técnicos encontrados na concepção de cada um dos subsistemas que se integram na operação do Vecarr. Assim sendo, apresentam-se detalhes pertinentes ao condicionamento de sinais, ao desenvolvimento do software de controle mediante as restrições da plataforma microprocessada empregada no projeto, a avaliação das resoluções e limites operacionais garantidas ao veículo, a escolha dos sensores, bem como o tratamento dado para atenuação dos ruídos irradiados e conduzidos. Destaca-se que a leitura de tal capítulo por pessoas que trabalham no desenvolvimento de veículos elétricos pode se tornar em uma ajuda substancial para a economia de tempo no tratamento a problemas similares.

O capítulo 6 - Avaliação de Desempenho do Vecarr - apresenta os sinais e as respectivas análises extraídas do veículo montado e operando sob as duas possíveis estruturas de controle projetadas nos capítulos anteriores. Os sinais foram extraídos nas situações típicas de deslocamento das quais o o Vecarr possa operar.

O capítulo 7 – Conclusões e trabalhos futuros – apresenta as conclusões do trabalho no atual estágio de desenvolvimento, bem como destaca diversas oportunidades para a melhoria do veículo a partir de trabalhos que possam ser desenvolvidos pela comunidade científica.

Capítulo 2

Tecnologias para sistemas de cooperação homem-robô e para detecção da intenção de movimento de pessoas

O controle do sistema de acionamento do Vecarr dependerá da geração dos sinais de referência de trajetória. Essas referências serão produzidas pela detecção da intenção de movimento do condutor do veículo, de tal forma que se mantenha inalterada a forma intuitiva para movimentação do mesmo. Essa abordagem é necessária para que o auxílio à tração humana não se faça somente pela multiplicação da força dos braços através do acionamento elétrico, mas também pela pronta disponibilidade de se locomover o veículo sem a necessidade de qualquer treinamento. A literatura científica apresenta diversos trabalhos pertinentes à detecção da intenção de movimento de pessoas. Tais trabalhos apresentam diferentes contextos de aplicação, com vários métodos de sensoriamento e processamento de sinais. Para se avaliar quais desses métodos de sensoriamento são mais adequados ao Vecarr, esse capítulo apresenta uma extensa revisão bibliográfica sobre a detecção de intenção de movimento de pessoas. Nessa revisão bibliográfica, cada método apresentado é criticado quanto ao grau de invasão de sensores no corpo das pessoas, quanto à necessidade de deslocamento de equipamentos específicos para o processamento dos sinais, quanto ao custo e quanto a sua disponibilidade para montagem no Vecarr.

Além da detecção da intenção de movimento, é importante contextualizar o Vecarr como solução para auxiliar as pessoas no deslocamento de cargas. Como o Vecarr é um corpo no espaço com um computador embarcado, ele pode ser qualificado como um robô. Dentre diversas tecnologias de robôs - humanóides, micro-robôs, cirúrgicos, submarinos, de exploração - o

Vecarr se qualifica como sendo um robô de carga operando em cooperação com seres humanos. Sob essa qualificação, a literatura científica apresenta diversos trabalhos, os quais destacam os seguintes tópicos:

- aspectos filosóficos da cooperação homem-robô;
- aspectos tecnológicos da construção dos robôs de cooperação, tais como os métodos de sensoriamento, acionamento, número de graus de liberdade necessários para a execução de uma tarefa e número de elementos atuadores necessários ;
- aspectos de controle para que o robô siga a trajetória imposta pela pessoa que o opera, bem como produza uma sensação agradável de interface com essa pessoa;
- aspectos de segurança na cooperação homem-robô.

Dentre os diversos aspectos pertinentes à cooperação homem-robô, será apresentada uma vasta revisão bibliográfica, da qual será mostrado o estado da arte na referida cooperação, bem como haverá uma abordagem crítica para correlacionar tais trabalhos ao contexto do Vecarr. Nessa correlação, serão mostrados os pontos que podem ser aproveitados no desenvolvimento do Vecarr, bem como as oportunidades de contribuição ainda não publicadas pela comunidade científica.

Os dois pontos destacados - detecção da intenção de movimento e tecnologias de cooperação homem-robô - serão apresentados nas próximas seções deste capítulo.

2.1 Tecnologias para detecção da intenção de movimento

2.1.1 Detecção da intenção de movimento em sistemas de direção elétrica

Considerando a mecânica clássica [68], observa-se que a força é o estado físico que caracteriza a intenção que um elemento manifesta em alterar o estado energético de um outro corpo. A variável de trajetória que caracteriza a imposição de força é a aceleração. Assim sendo, uma proposta para detectar a intenção de movimento do condutor ao veículo seria a medida da aceleração imposta por ele.

A medição de aceleração é vastamente difundida em sistemas de direção elétrica. Tais sistemas são destinados a multiplicar, de forma controlada, o conjugado imposto pelo motorista

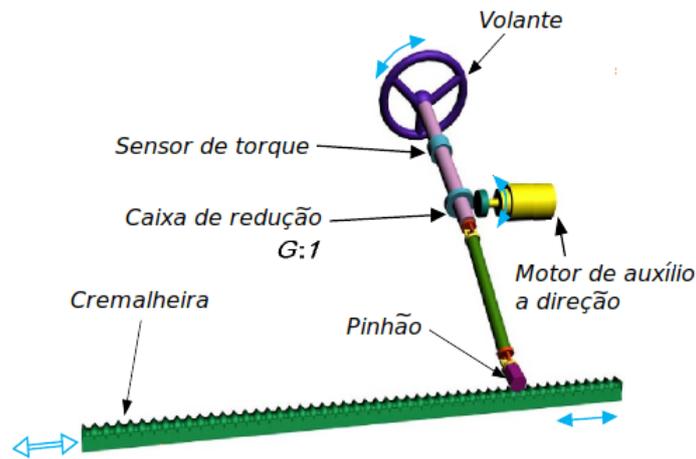


Figura 2.1: Sistema de direção elétrica reproduzido de Zhang *et al* [36]

à barra de direção de um veículo. Em linhas gerais, esta aplicação demanda um sistema de controle que permita ao condutor desenvolver conjugados de baixa amplitude para guinar o veículo quando o mesmo se desloca com baixa velocidade, e exija conjugados de alta amplitude para deslocamentos angulares do volante quando o veículo se desloca com alta velocidade. Essa estratégia evita o capotamento do veículo decorrente de comandos de guinagem bruscos aplicados pelos motoristas, tal como ocorre com veículos munidos de direção hidráulica [53]. A Figura 2.1 apresenta a ilustração da configuração clássica para o sistema de direção elétrica [36].

Zhang *et al* [36] mostram que a detecção da intenção de movimento do condutor pode ser feita por um sensor de conjugado. Esse sinal é processado por uma unidade de geração de referências, à qual aplica um comando de conjugado ao acionamento do motor elétrico ligado ao eixo da barra de direção, tal como mostrado na Figura 2.1. Extrapolando esse conceito ao contexto do Vecarr, observa-se que o sistema de direção elétrica se comporta adicionando o conjugado do motor elétrico ao conjugado imposto pelo motorista no eixo da barra de direção. Assim sendo, a direção elétrica se comporta multiplicando o conjugado imposto pelo motorista e deixa, à cargo do mesmo, a imposição de velocidade de guinagem do volante. Como o Vecarr trabalhará sob a mesma premissa, ou seja, multiplicando a força do condutor e deixando que o mesmo imponha a velocidade de deslocamento, conclui-se que a estratégia apresentada por Zhang *et al* [36] para a direção elétrica possa ser aplicável ao sistema de controle do Vecarr.

Morita *et al* [54] afirmam que a qualidade da direção é medida, sob a avaliação do motorista, pelo atraso entre a resposta de posição angular das rodas e a aplicação de comando de guinada

ao volante, bem como pela sensação de dirigibilidade que é percebida ao volante. Lianbing *et al* [49] afirmam que essa sensação é resultante da ação combinada entre os conjugados impostos pelo motor elétrico, pela estrada e pela condição dos pneus. Para rejeitar oscilações na posição angular do volante, tais como aquelas provocadas por desalinhamento dos pneus, irregularidades na pista e ruídos provenientes do sensor de conjugado, Lianbing *et al* [49] e Qiang *et al* [67] apresentam projetos de controladores baseados na filtragem de ruídos alocados nas frequências típicas de tais fenômenos. Ao tratar do atraso entre o comando do condutor e a guinagem do veículo em sistemas de direção elétrica, o trabalho de Morita *et al* [54] apresenta um indicador de qualidade que pode ser copiado para o Vecarr. Para garantir que não exista atraso entre o comando do condutor e a aceleração do veículo, deverá ser alocada banda passante suficientemente alta pra garantir que o sistema de controle seja mais rápido que a dinâmica do sinal de força proveniente das mãos do condutor. Essa constatação exigirá o levantamento do sinal típico de força imposto por pessoas a um veículo de carga com tração humana. Tal trabalho será apresentado no capítulo 4.

Para auxiliar na manobrabilidade, Morita *et al* [54] apresenta a aplicação de um motor adicional acoplado ao eixo do volante, tal que o mesmo desempenhe o papel de uma transmissão mecânica de razão variável, e desenvolve um sistema de controle que desacople a posição angular controlada na transmissão variável do conjugado controlado pelo motor da direção elétrica. Nesse contexto, o sistema garante, via transmissão variável, que a posição angular estabelecida pelo volante é amplificada em velocidades típicas de estacionamento e a mesma é atenuada quando o veículo está em velocidade de cruzeiro. Esta solução garante a boa dirigibilidade do veículo, porém possui acréscimo de custo quando comparada à direção elétrica clássica, a qual é apresentada na Figura 2.1 . Além disso, a aplicação de um segundo motor aumenta o momento de inércia no eixo de direção e a massa do veículo, sendo a última característica altamente indesejada em sistemas embarcados, tal como o Vecarr, devido à redução na autonomia dos mesmos.

Parmar [62] e Chabaan [21] propõem a eliminação do sensor de conjugado via observadores de estados. A utilização de observadores de estado determinaria corte de custo ao projeto Vecarr, porém sua utilização deve ser avaliada com cuidado, pois o veículo irá operar em ampla faixa de velocidade e conjugado, o que dificulta a precisão na estimativa de observadores. No contexto de veículo de trabalho, erros de estimativa dos estados físicos levarão a erros de controle, aumentando a probabilidade de acidentes.

2.1.2 Detecção da intenção de movimento por acelerômetros

Sant´Anna *et al* [69] propõem a identificação de problemas ortopédicos relacionados às pernas através de movimentos de passada medidos por acelerômetros e colchões de pressão. Os acelerômetros são instalados nas canelas direita e esquerda de idosos e os colchões de pressão indicam os momentos quando os calcanhares tocam ou saem do solo. Através dos sinais adquiridos e processados, identificam-se cenários específicos de caminhada, tais como corrida, passada lenta ou passada manca. No contexto do Vecarr, os colchões de pressão poderiam ser aplicados ao guidão para identificação de queda do condutor. Os acelerômetros podem também ser acoplados ao guidão e serem aplicados para detectar a intensidade da força aplicada pelo condutor. Esta intensidade pode ser interpretada como sendo a intenção de movimento do condutor.

Chae *et al* [22] propõem a utilização de acelerômetros, giroscópios e sensores geomagnéticos para o desenvolvimento de um sensor de movimento tridimensional. Os acelerômetros são responsáveis pela medição de acelerações no sentido de translação do corpo. Os giroscópios são utilizados para medição de velocidades angulares em torno dos eixos cartesianos do referencial do sensor. A medição dos giroscópios é auxiliada pelos sensores geomagnéticos, os quais detectam a direção absoluta do movimento através da medição do sentido do campo magnético da Terra. Estes sensores têm encontrado vasta aplicação em aparelhos de telefonia celular, laptops, câmeras digitais, jogos eletrônicos e sistemas de transporte. No contexto do Vecarr, tais sensores poderiam ser utilizados para a detecção do comando de aceleração do operador; determinação de queda do operador e gatilhamento do sistema de segurança, de tal forma que o Vecarr não passe sobre o condutor; e indicação do ângulo de arfagem do veículo, o qual terá valor não nulo quando o operador se deslocar em superfícies inclinadas.

A utilização de acelerômetros auxiliaria o sistema de geração de referências do acionamento elétrico do Vecarr. A aplicação dos mesmos, porém, possui o inconveniente de se demandar a aplicação de cabos de sinal para alimentação do sensor e transmissão dos dados de medição, ou, em sensores com transmissão via Bluetooth [69], seria demandado a utilização de baterias acopladas aos acelerômetros.

2.1.3 Detecção da intenção de movimento por sinais biológicos

A literatura científica no ramo da bioengenharia apresenta trabalhos onde sinais biológicos captados por eletroencefalogramas, magnetoencefalogramas e eletromiogramas são utilizados para a detecção da intenção de movimento de partes específicas do corpo de pessoas.

Hussein [38] apresenta a utilização de eletromiogramas nos músculos do bíceps e tríceps para detectar a intenção desenvolvida por pacientes paraplégicos para se levantar ou assentar. Kirsch [38] propõem a aplicação de eletromiogramas com eletrodos aplicados ao ombro de pacientes tetraplégicos para detectar sua intenção de movimento dos braços. Nesses experimentos os dados coletados devem ser fornecidos à estruturas de processamento de sinais que são treinadas para detectar padrões a partir dos potenciais de ação dos indivíduos. A partir desse ponto poderia ocorrer a geração das referências de comando à acionamentos elétricos dedicados ao corpo de pessoas com restrições de movimento.

Sepulveda [70] apresenta em seu trabalho a utilização de eletroencefalogramas para detectar a intenção de movimento do pulso. Esse estudo contribui para a geração das referências de movimento aplicadas à acionamentos elétricos de próteses de mão e demanda a instalação correta dos eletrodos do eletroencefalograma, bem como uma sofisticada interface entre cérebro e computador para tratamento de sinais. Comparada aos métodos que empregam eletromiogramas, o eletroencefalograma possui a vantagem de ser não invasivo ao corpo do paciente.

Battapady [8] apresenta uma proposta de detecção da intenção de diferentes movimentos das mãos através do magnetoencefalograma. Neste método o resultado do sensoriamento é apresentado através de um sistema de visualização de imagens. Não há a demanda por eletrodos invasivos ao corpo da pessoa sob observação. Apesar de ser mais caro que o eletroencefalograma, este método é mais imune aos ruídos presentes no ambiente.

No contexto do Vecarr, as abordagens que demandam sinais biológicos apresentam o inconveniente de se demandar a instalação dos eletrodos nos profissionais que conduzem o veículo, bem como o deslocamento do sistema de aquisição junto aos mesmos. Além do incômodo de ter o corpo perfurado pelos eletrodos, no caso dos eletromiogramas, ou a cabeça raspada para colagem dos eletrodos, no caso dos eletro e magnetoencefalogramas, há a necessidade de mão de obra especializada para fazer diariamente a instalação dos sensores, o que tornaria o custo dessa abordagem inviável para as aplicações atendidas pelo Vecarr.

2.1.4 Detecção da intenção de movimento por câmeras e luvas com filmes de strain-gage

Para a utilização de robôs assistentes à tarefas humanas, há a necessidade de se detectar a intenção de movimento do usuário. Nesta linha de pesquisa, Huo [37] apresenta a estrutura de um sistema de sensoriamento de força que se prende ao braço do usuário por dois anéis e que detecta a força desenvolvida no antebraço através da deformação de resistores. Neste trabalho,

a intenção de movimento do usuário é usada para gerar as referências de movimento do robô que reproduz os movimentos do antebraço.

Kawasaki *et al* [44] apresentam a proposta para detecção da intenção de movimento através de uma luva composta por strain-gages, os quais detectam as trajetórias desenvolvidas nos dedos do usuário e as reproduz em uma mão presente em ambiente de realidade virtual.

Gehrig *et al* [30] mostram a possibilidade de se detectar a intenção de movimento de um usuário mestre a um robô humanóide escravo através do processamento de imagens. Nesta abordagem, o mestre é filmado, sua imagem é processada e comandos são gerados para os acionamentos elétricos constituintes dos atuadores de robôs multitarefas.

Para o contexto do Vecarr, a instalação de sensores de força no braço dos condutores demandaria mão de obra especializada e cabeamento lançado ao corpo dos mesmos, o que provocaria incômodo e seria propenso à falhas por rupturas de cabos. Para a utilização de luvas com filmes de strain-gages, há impedimentos pois os trabalhadores precisam das mãos para carregar e descarregar os materiais dos veículos e podem, assim, danificar as luvas com muita facilidade. Quanto à utilização de câmeras, haveria a necessidade de se deslocar a câmera junto ao usuário para se gerar as referências de movimento ao motor de tração do Vecarr, ou então realizar telemanipulação, onde os comandos de referência seriam enviados ao veículo à longas distâncias, o que aumentaria demasiadamente o custo da solução.

2.1.5 Detecção da intenção de movimento pela corrente de motores elétricos

Uma alternativa interessante à detecção de intenção e que ainda não foi explorada na literatura científica é a utilização da corrente do motor de tração do Vecarr. Segundo Silva *et al* [75] e Lipo [56], a utilização do modelo e controle em vetores espaciais de uma máquina elétrica possibilita que se detecte, por componentes de corrente desacopladas, qual é o conjugado imposto ao motor. Como o conjugado é o espelho da aceleração angular, a corrente poderia ser usada para medir a intenção de movimento do operador. Esta solução leva à utilização de um elemento de potência do Acionamento como sensor, dispensando o uso de sensores de sinal e unidades para processamentos dos mesmos. Porém a aplicação desta solução demanda um estudo detalhado, pois há dúvidas de implementação tais como:

- Quando o operador deslocar em superfícies inclinadas, haverá aplicação de conjugado da gravidade no eixo da máquina. Neste contexto, deve ser diferenciada a intenção de

movimento do operador do efeito da gravidade. Para isso, o acelerômetro seria uma solução interessante;

- É necessário identificar diferentes níveis de força e intenção de movimento do operador pois, se o sistema seguir uma única rampa de aceleração e frenagem, situações de emergência podem não ser atendidas, tais como, por exemplo, a frenagem brusca do Vecarr para evitar colisões;
- Com a utilização do Vecarr em longos trajetos, o nível de carga do banco de baterias será reduzido e, nesse contexto, não será possível aplicar a magnetização nominal do motor de tração. Haverá então alteração no fluxo de magnetização da máquina e conseqüentemente no nível de transdução entre a corrente de torque e o torque de carga. Assim sendo, uma mesma intenção de movimento do operador poderia ser interpretada de forma diferente de acordo com o nível de carga das baterias;
- Devido a transmissão mecânica, a força do operador será refletida com amplitude muito reduzida no eixo do motor, o que dificultaria o sensoriamento da mesma através da corrente elétrica. Se as forças de atrito estática e cinética nos mancais da transmissão e do motor forem maiores que a força imposta pelo usuário, seria impossível de se detectar a força imposta pela pessoa através da corrente do motor. Nesse cenário, o próprio atrito consumiria a energia imposta pela pessoa.

Apesar dos questionamentos listados, a detecção da intenção de movimento pela corrente de um motor elétrico embarcado é pioneira e possui atrativos singulares à uma aplicação dotada de severas condições de contorno, onde há a demanda por alto índice de disponibilidade do equipamento e aplicação em situações agressivas. Esta possibilidade será tecnicamente avaliada dentro do trabalho da tese.

2.2 Estado da arte na cooperação homem-robô

2.2.1 Caracterização geral da cooperação homem-robô

Um dos trabalhos mais citados pela comunidade de Robótica e Automação da IEEE foi desenvolvido por Kazerooni [45] e explica aspectos filosóficos para entendimento da cooperação homem-robô.

Nessa cooperação destaca-se a associação entre a inteligência humana, a qual é superior àquela desenvolvida pelos atuais sistemas de controle, e a capacidade de potência mecânica do

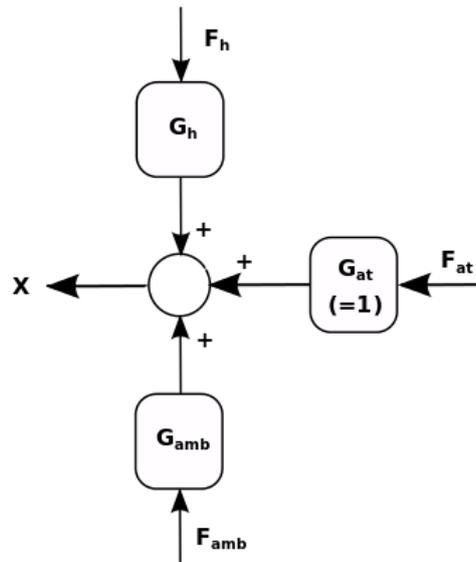


Figura 2.2: Contribuições do homem, do robô e da carga externa para o posicionamento de um ponto de controle em uma posição “x”.

robô, a qual é superior àquela desenvolvida pela musculatura humana. Para o desenvolvimento dessa cooperação, é necessário que a pessoa vista ou toque o robô e imponha a ele a trajetória necessária a se seguir, independente da carga alocada à sua estrutura.

Na atividade de deslocamento, será necessário levar um objeto ou ferramenta presa ao robô multiplicador à outro ponto do espaço, seguindo uma dinâmica imposta pela pessoa. Para isso, a pessoa destacará um ponto do robô e controlará a sua posição dinamicamente. O posicionamento desse ponto será função das forças de atuação impostas pela pessoa, pelo atuador do robô e por elementos externos, tal como previsto pela 2ª lei de Newton. Existem assim três funções de sensibilidade, as quais mapeiam as forças impostas pela pessoa, pelo atuador do robô e pela força de carga externa (ambiente), à posição final do ponto de controle do robô. Essa ideia é apresentada no diagrama de blocos da Figura 2.2.

A caracterização do sistema de cooperação completo, tal como apresentada por Kazerooni [45] é apresentada na Figura 2.3. Pela relevância de tal Figura na concepção dos sistemas de cooperação homem-robô, a mesma é explicada nos parágrafos seguintes.

A aplicação de força pela pessoa - F_h - é função da referência de força presente no cérebro - u_h - das propriedades dinâmicas do braço humano que conduz o multiplicador - S_h - e da atual posição do ponto de controle do multiplicador - x .

Da mesma forma, a força aplicada pelo atuador do robô multiplicador - F_{at} - é função do efeito dinâmico de multiplicação das forças impostas pela pessoa - F_h - e pelo ambiente - F_{amb} - e pela função dinâmica de multiplicação desejada para o robô - H_1 e H_2 . Esse efeito dinâmico de multiplicação é modelado por um ganho do atuador G_{at} , o qual recebe em sua entrada a soma

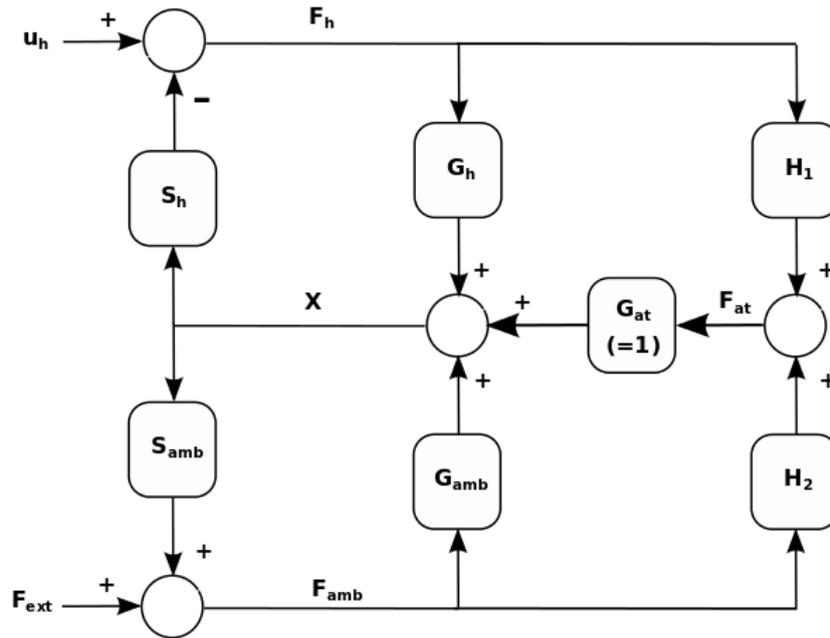


Figura 2.3: Diagrama de blocos destacando as contribuições do homem, do robô e do ambiente externo para o posicionamento de um ponto de controle no sistema de cooperação homem-robô.

das forças sensoriadas à partir da pessoa e do ambiente. O sensoriamento da força imposta pela pessoa e sua posterior compensação no sistema de controle serão caracterizados por uma função \$H_1\$. Já o sensoriamento e compensação no sistema de controle da força imposta pelo ambiente são caracterizados pela função \$H_2\$.

Finalmente, a força imposta pelo ambiente - \$F_{amb}\$ - é função da posição do robô multiplicador e de suas características geométricas. Tal função é implementada pelo modelo físico do ambiente como função da posição do ponto de controle - \$S_{amb}\$. Destaca-se também que a força imposta pelo ambiente será percebida pelo atuador como sendo um distúrbio sensoriado e compensado pela função \$H_2\$.

A partir da Figura 2.3, podem ser obtidas as relações de como a força do ambiente é percebida pelo ser humano, bem como a atuação do ser humano sobre o posicionamento do corpo. Tais relações são apresentadas nas equações 2.1 e 2.2.

$$\frac{f_h(s)}{f_{amb}(s)} = - \frac{1 + S_{amb} \cdot G_{at} \cdot H_2 + G_{amb} \cdot S_{amb}}{S_{amb} \cdot G_h + S_{amb} \cdot G_{at} \cdot H_1} \quad (2.1)$$

$$\frac{f_h(s)}{X(s)} = - \frac{1 + S_{amb} \cdot G_{at} \cdot H_2 + G_{amb} \cdot S_{amb}}{G_h + G_{at} \cdot H_1} \quad (2.2)$$

Tal como mostrado na função de transferência da equação 2.1, é possível controlar dinamicamente a forma como a mão humana irá perceber a força do ambiente externo durante o

trabalho de cooperação com o robô através do ganho H_1 do compensador. Se o atuador tiver banda passante muito maior que o comando de força do sistema de controle “ f_{at} ”, o sistema como um todo irá perceber o ganho do atuador como sendo basicamente unitário, ou seja, $G_{at} = 1$. Além disso, se a força imposta pelo ambiente f_{amb} não for medida, ou seja, H_2 for nulo, a percepção da mão humana pela atuação do ambiente, apresentada na equação 2.1, pode ser simplificada tal como mostrado na equação 2.3.

$$\frac{f_h(s)}{f_{amb}(s)} = -\frac{1 + G_{amb} \cdot S_{amb}}{S_{amb} \cdot G_h + S_{amb} \cdot H_1} \quad (2.3)$$

Tal como apresentado na equação 2.3, é possível controlar a dinâmica da força percebida na mão humana pela estrutura de controle H_1 . Assim sendo, se H_1 possuir um valor elevado em toda faixa de frequências que caracteriza o sinal de força do ambiente f_{amb} , a força percebida na mão humana será muito baixa e, nesse cenário, o sistema de cooperação irá operar basicamente como um multiplicador de força. Por outro lado, se o ganho $H_1(s)$ for configurado como um filtro passa-baixas, com frequência de corte menor que a faixa de frequências imposta pelo ambiente externo, o sistema de cooperação irá amortecer vibrações que o ambiente externo poderia impôr à mão humana, tal como seria conveniente na utilização de um martetele ou uma furadeira manipulada por um braço mecânico que fosse comandado pelo contato com uma pessoa.

Generalizando a análise anterior, é possível configurar $H_1(s)$ para que, sob a percepção humana, o sistema de cooperação possua o desempenho dinâmico que se desejar. No contexto do Vecarr, essa ideia pode ser utilizada para a multiplicação da força da pessoa e a manutenção de níveis constantes de força, tal que a mesma não perceba variações na força gravitacional quando alterar a inclinação do plano onde se desloca, bem como é possível se configurar o ganho do sistema de controle para que a pessoa não perceba oscilações de força em alta frequência quando o veículo se deslocar em solos irregulares, bem como seria possível configurar o Vecarr para que a pessoa sentisse que está puxando uma outra pessoa, de tal forma que a interface com o veículo em jornadas longas fosse mais agradável.

2.2.2 Sistema de cooperação homem-robô com determinação prévia das trajetórias de referência pelo contato da pessoa com o robô

Em alguns cenários, a permanência de pessoas no espaço de trabalho de robôs pode ser muito perigosa, porém necessária. Para aumentar a segurança nesses casos, Park *et al* [60]

desenvolveram um sistema de cooperação homem-robô no qual as referências de trajetórias do robô são criadas quando uma pessoa toca o terminal de trabalho e o leva aos locais de uma peça onde, futuramente, uma ferramenta deve tocar. Para isso, o robô é equipado inicialmente com uma ferramenta de ensino. Além disso, em sua constituição permanente, o robô possui um sensor de conjugado aplicado à cada uma de suas juntas revolutas. Na fase de treinamento, os sinais dos sensores de conjugado em cada junção são armazenados e, após essa fase, a ferramenta de ensino é trocada pela ferramenta de trabalho, tal como um ferro de solda, um spray de tinta ou uma lixadeira, e o robô repete a trajetória aprendida.

Tal estratégia é interessante para sistemas que trabalham em espaços restritos e com tarefas repetitivas. No caso do Vecarr o veículo irá circular em diferentes trajetórias, as quais serão escolhidas em tempo real pelo condutor. De qualquer forma, a ideia de se armazenar sinais de aprendizado ao sistema pode ser aproveitada para caracterizar estados emocionais ou físicos do condutor. Dessa maneira, se o sinal da força característico de um problema de saúde fosse percebido durante o trabalho, o Vecarr poderia alterar sua impedância mecânica equivalente para ajudar o condutor.

2.2.3 Sistema de cooperação homem-robô com rejeição à colisões por processamento digital de imagens

Para garantir a segurança de pessoas que compartilham o ambiente de trabalho com robôs, Gecks e Henrich [47] propuseram a utilização de câmeras para monitorar esse ambiente. Inicialmente são feitas imagens do movimento desejado para o robô com o espaço de trabalho livre de obstáculos. Posteriormente, em tempo real de trabalho, são capturadas imagens e as mesmas subtraídas daquelas gravadas durante a ausência de obstáculos. Se a subtração indicar uma diferença significativa em alguma região do espaço que será futuramente ocupada pelo robô, há uma interrupção na rota prevista e uma nova rota é aplicada às referências de trajetória.

Essa estratégia é interessante pelo baixo custo de câmeras e pelo algoritmo de baixo custo computacional para a realização da subtração de imagens. No contexto do Vecarr, porém, a escolha da trajetória ocorre em tempo real e isso torna muito complexo o pré-armazenamento das imagens livres de obstáculos. De qualquer forma, a ideia poderia ser aplicada como um recurso para aumento de segurança do Vecarr. Nesse cenário, uma ou mais câmeras seriam instaladas no veículo e capturariam as possíveis posições onde o condutor pode estar presente durante o deslocamento. Caso uma das imagens denotasse a ausência do condutor, seria interpretada que o mesmo abandonou a barra de comandos, tal como ocorreria em uma queda, e o

veículo seria parado imediatamente para evitar atropelamentos.

Uma outra opção de uso do sistema de câmeras seria a determinação da força imposta pelo usuário. Se uma câmera filmasse uma mola, a qual fosse comprimida ou tracionada pelo usuário, seria possível calcular a deformação e conseqüentemente a força imposta pelo mesmo. Esse cenário é pouco interessante frente à praticidade de se instalar uma célula de carga para medição de força, porém aumenta a rejeição do sistema a ruídos de modo comum. No caso da célula de carga, a mesma é instalada próxima à estrutura do veículo e, portanto a sua capacitância equivalente medida entre a estrutura do veículo e os cabos de sinal é maior que aquela que poderia ser obtida com uma câmera instalada em uma estrutura isolada e mais afastada do veículo. Assim sendo, essa alternativa reduziria a corrente de modo comum produzida pelo dV/dt elevado observado na síntese da tensão aplicada pelo conversor ao motor de tração.

2.2.4 Sistemas de cooperação homem-robô com ajuste dinâmico da impedância mecânica do robô para garantia da estabilidade de operação

Como mostrado por Tsumugiwa *et al* [79], a atividade desenvolvida na cooperação homem-robô pode ser prejudicada pela instabilidade provocada devido à variação da impedância mecânica do braço humano. Segundo ele, o parâmetro da impedância mecânica equivalente do braço humano que pode sofrer mais alterações é sua constante elástica. Além disso, a faixa de variação é maior quando a mão se desloca à velocidades inferiores a 2cm/s. Nessa condição, se a constante elástica do braço humano crescer demasiadamente e o sistema de controle possuir atrasos, tais como aqueles desenvolvidos em filtros, poderá ocorrer a instabilidade do conjunto homem-robô equivalente. Para compensar esse efeito e garantir a estabilidade, é necessário aumentar a constante de amortecimento equivalente do robô. Tal ideia, da forma proposta por Tsumugiwa *et al* [79], é apresentada na Figura 2.4.

Pelo sistema apresentado na Figura 2.4, Tsumugiwa estima a constante elástica do braço da pessoa pela formulação de Hook ($K_h = \Delta F_h / \Delta X$). A partir da estimativa dessa constante e da velocidade de deslocamento da ferramenta, o sistema de controle altera dinamicamente a constante de amortecimento viscoso (b_r), de tal forma a manter o conjunto estável.

No contexto do Vecarr haverá deslocamentos a baixa velocidade quando o usuário desejar manobrar o veículo em espaços restritos. Há portanto a necessidade de se avaliar se o sistema será estável nessas condições pois, caso contrário, um movimento oscilatório não amortecido

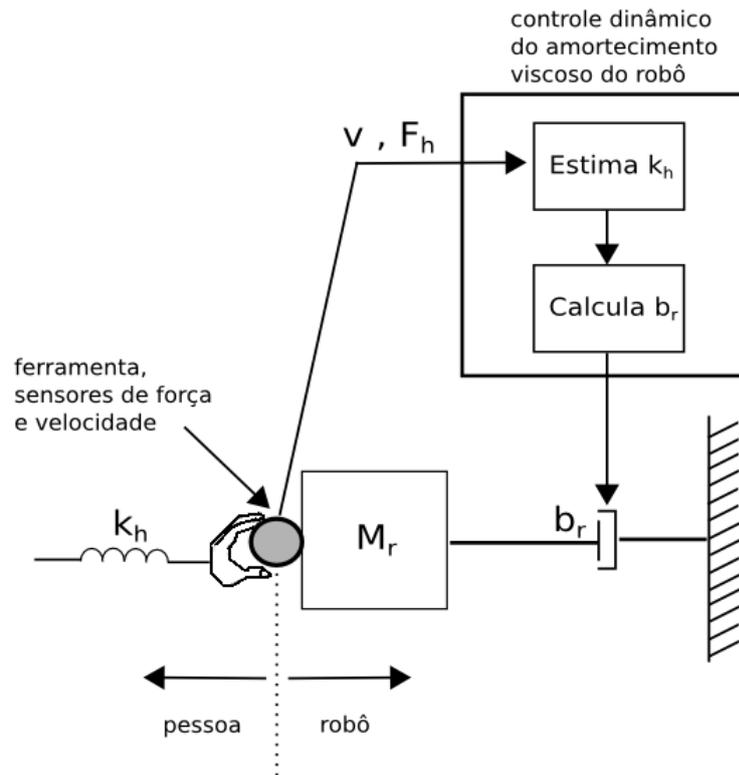


Figura 2.4: Compensação dinâmica do atrito viscoso equivalente do robô (b_r) para garantir a estabilidade do sistema de cooperação frente às variações na constante elástica do braço humano (k_h). Adaptado de Tsumugiwa *et al* [79]

poderá fazer com que o veículo se choque com obstáculos da vizinhança. Tal situação seria catastrófica se ocorresse, por exemplo, com catadores de papel posicionando o Vecarr próximo a veículos caros na rua, ou se um servente de obra posicionando o Vecarr colidisse o veículo em uma parte já acabada em uma construção.

Extrapolando o conceito apresentado, destaca-se também a possibilidade de se alterar a impedância mecânica equivalente do sistema não somente para a garantia de estabilidade, mas para garantia de segurança do sistema. Por exemplo, se o condutor do Vecarr impuser ao veículo uma velocidade na qual o acionamento não consiga fazê-lo parar em uma distância menor que a aquela observada entre o condutor e a roda, o veículo irá atropelar o condutor caso o mesmo caia ao chão. Nesse cenário seria interessante aumentar dinamicamente a constante de viscosidade do sistema para que o usuário necessite de uma força muito alta para conseguir aumentar ainda mais a velocidade do veículo e, portanto, se sinta inibido em operar o veículo à velocidades perigosas.

Além disso, a estimação dinâmica da constante elástica do braço da pessoa pode ser utilizada para avaliação de fadiga durante um determinado período de tempo e, antes de um nível crítico em que a musculatura sofra lesões, o sistema poderia emitir alertas ao seu condutor.

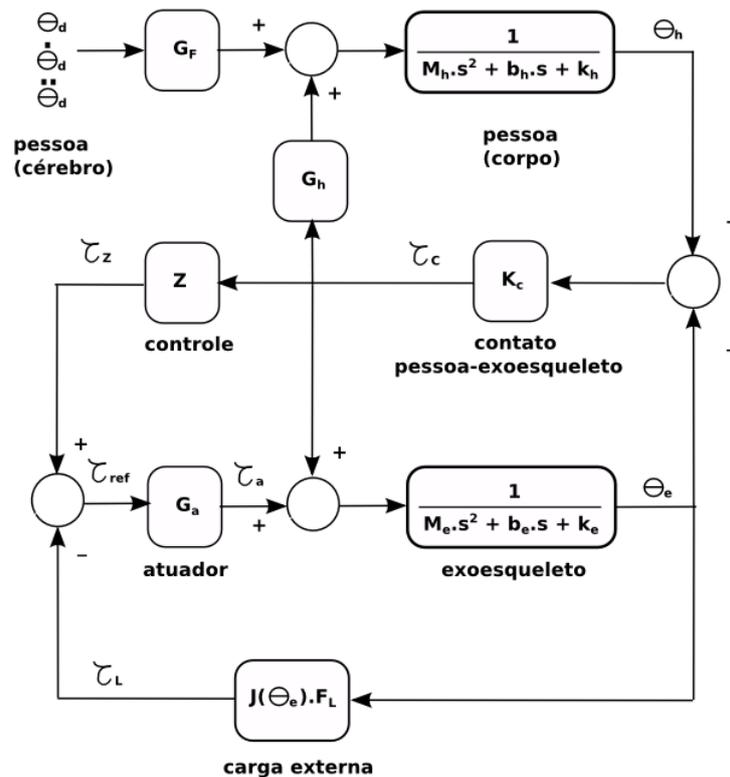


Figura 2.5: Diagrama de blocos do sistema de cooperação homem-exoesqueleto.

2.2.5 Sistemas de cooperação homem-robô através de exoesqueletos

Alguns sistemas de interação homem-robô são implementados através de estruturas mecânicas que são “vestidas” pela pessoa. Essas estruturas são denominadas de exoesqueletos e as mesmas são aplicadas para aumento da capacidade de carga, para fins fisioterápicos e para a reposição de partes mutiladas do corpo. Da ficção científica recente, um exemplo interessante para ilustrar o conceito de um exoesqueleto seria o Homem de Ferro.

Na literatura científica, Cao [16] apresenta a estrutura de uma perna exoesqueleto, destacando o desenvolvimento do modelo dinâmico existente na interação homem-robô do exoesqueleto. Tal modelo é apresentado na Figura 2.5 e o mesmo destaca os seguintes comportamentos:

- a posição angular da junção do quadril θ_h é produzida por um comando mental aplicado ao sistema massa-mola-amortecedor representativo da perna (M_h, b_h, k_h). Esse comando mental é produzido pela sobreposição de um comando de feed-forward G_f , representado a força necessária para seguir a trajetória mental desejada, e um comando de realimentação G_h , o qual transmite à mente o conjugado de contato entre a pessoa e o exoesqueleto. O comando de realimentação garante, por exemplo, que a pessoa pare de exercer força sobre o exoesqueleto caso a operação do conjunto esteja machucando sua perna;
- de acordo com a diferença entre as posições angulares do quadril e do exoesqueleto ($\theta_h -$

θ_E) há a produção de um conjugado de contato τ_c entre a pessoa e o exoesqueleto, o qual é modelado pelo efeito de uma mola equivalente K_c . Esse conjugado pode ser sensoriado e a malha de controle, modelada pelo bloco $Z(s)$, irá trabalhar para que τ_c seja nulo, ou seja, a pessoa não perceba carga imposta à sua perna pela estrutura do exoesqueleto e da carga útil embarcada na mochila que é presa ao exoesqueleto. Em outras palavras, o conjugado de contato é a referência de trajetória imposta ao sistema de controle;

- a carga τ_L imposta ao exoesqueleto é função da massa embarcada na mochila e da configuração do exoesqueleto. Seu comportamento é modelado através do produto da matriz Jacobiana pela força externa, ou seja, $J(\theta_e).F_L$;
- o conjugado de referência imposto ao atuador τ_{ref} deverá garantir o rastreamento da trajetória e a rejeição à perturbação de carga, ou seja, deverá garantir que o conjugado de contato na perna da pessoa seja nulo e que a mesma não perceba a carga embarcada na mochila do exoesqueleto.
- o atuador G_a deverá reproduzir os comandos de conjugado de referência demandados pelo sistema de controle sobre o atuador do exoesqueleto. Para isso, o atuador deve ser muito mais rápido que a dinâmica dos demais elementos do sistema, de tal forma que ele seja visto como um bloco de ganho 1 e banda passante infinita.

Pautado nessas considerações e modelando o exoesqueleto pela impedância mecânica M_e , b_e e K_e , tal como mostrado na Figura 2.5, a função de transferência entre as posições da pessoa e do exoesqueleto é apresentada na equação 2.4.

$$\frac{\theta_e}{\theta_h} = \frac{1}{\frac{M_e \cdot s^2 + b_e \cdot s + K_e}{K_c \cdot (1 + Z)} + 1} \quad (2.4)$$

Tal como mostrado na equação 2.4, para que não exista diferença entre θ_e e θ_h , é recomendado que a constante de acoplamento elástico do contato homem-exoesqueleto e o ganho da função $Z(s)$ sejam altos, bem como a impedância equivalente do exoesqueleto seja baixa. Geralmente o projetista irá atuar, por *software*, no ganho da função $Z(s)$. O cuidado a se tomar é não aumentar demais esse ganho para que o sistema não fique instável.

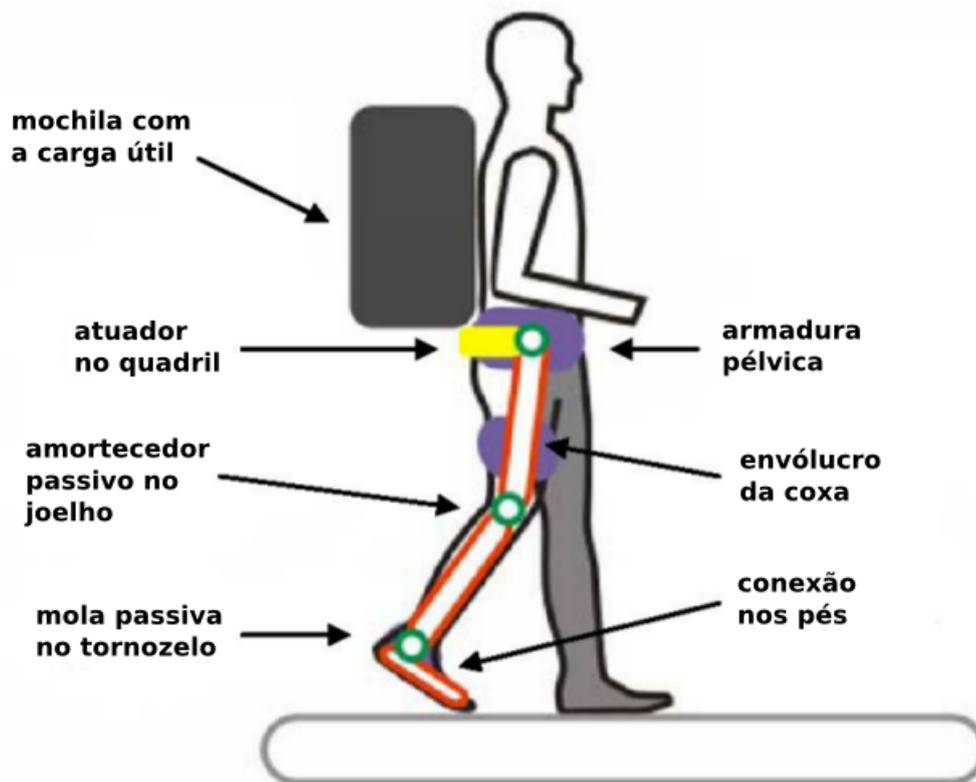


Figura 2.6: Ilustração da topologia da perna exoesqueleto desenvolvida no MIT por Walsh [82].

Walsh *et al* [82] apresentaram o exoesqueleto de uma perna destinado a ajudar ao aumento da capacidade de transporte de carga em uma mochila, a qual é fixa a estrutura do mesmo. Nessa pesquisa, o exoesqueleto é dotado de atuador na altura dos quadris e, para a rotação do joelho, há um sistema de amortecimento passivo. Para comandar o conjugado no motor preso ao quadril, são utilizadas informações do regime de caminhada típico de seres humanos, o qual pode ser caracterizado por um movimento cíclico com 3 estados para o quadril, 2 estados para o tornozelo e 4 para o joelho. Esses estados ocorrem simultaneamente e sempre na mesma sequência. Assim sendo, o conhecimento desse regime com a medição da intenção de movimento do condutor que veste o exoesqueleto leva à formulação da referência de trajetória do motor instalado na altura do quadril. Para medir a intenção de movimento do condutor, é instalado um sensor de força entre a coxa do último e a estrutura do exoesqueleto. Esse sensor é comprimido quando a coxa avança e tracionado quando ela recua. Uma ilustração do exoesqueleto em questão é apresentado na Figura 2.6 e o mesmo, dentro da pesquisa de Walsh *et al* [82], possibilitou o deslocamento de 52,8kg, sendo 33kg de carga e 19,8kg do exoesqueleto.

No contexto da engenharia biomédica Iqbal [39] apresenta o desenvolvimento de uma luva exoesqueleto destinada ao auxílio à reabilitação dos movimentos da mão. Essa luva possui 4 graus de liberdade por dedo, sendo vestida sobre o dorso da mão e atuada com um servomotor instalado no contato de cada dedo com a mão. A Figura 2.7 apresenta uma ilustração da

mesma.

Tal como mostrado na Figura 2.7, as juntas revolutas da luva desenvolvem os mesmos movimentos das juntas dos dedos. Há o sensoriamento de conjugado em cada junta e na ponta do dedo da pessoa. Além disso, os links de cada dedo são projetados para garantir à luva exoesqueleto o mesmo espaço de trabalho alcançável pelos dedos da mão de uma pessoa.

A partir do exercício determinado pelo fisioterapeuta responsável pela reabilitação da mão e dos sinais sensorizados, há o controle de conjugado no motor de atuação de cada dedo. Essa abordagem permite que o fisioterapeuta imprima uma carga regular de esforço a cada repetição, atenda a mais pacientes, acompanhe através das medições o progresso do tratamento e o paciente possa ter sua reabilitação acelerada pela possibilidade de fazer os exercícios sem a presença constante de uma segunda pessoa que puxe ou empurre a sua mão.

Observa-se nas pernas exoesqueletos desenvolvidos por Walsh [82] e Cao [16] que o sistema é subatuado. O movimento de guinagem da perna, necessário para que a pessoa mude a direção de translação, é desenvolvido pela própria pessoa. Já as atuações de quadril e joelho, as quais produzem forças efetivas para o movimento de translação da carga útil, são realizadas em parte por um sistema motorizado. Essa ideia pode ser extrapolada ao Vecarr, pois o mesmo demanda translação e guinagem, mas a maior parte da energia necessária para deslocar a carga é consumida no movimento de translação. Além disso, a aceleração angular na guinagem é baixa, levando à demanda de um baixo conjugado de guinagem, o qual poderia ser desenvolvido pela própria pessoa. Tal abordagem diminuiria consideravelmente o custo do sistema de deslocamento de carga, pois dispensaria a necessidade de um sensor de conjugado de guinagem, bem como um motor e conversor para realizar tal movimento.

2.2.6 Sistemas de cooperação homem-robô com interação exclusiva pelos objetos deslocados

A literatura técnica apresenta trabalhos para a cooperação homem-robô destinada ao deslocamento de objetos, mas com a interação entre a pessoa e o robô realizada unicamente através do objeto.

Nessa linha de pesquisa, Kosuge *et al* [48] apresentam um sistema composto por dois robôs, cada qual com 6 graus de liberdade, os quais são aplicados para o deslocamento de carga em coordenação com uma pessoa. A pessoa e os robôs apoiam a carga em pontos diferentes de sua estrutura e os robôs multiplicam a força da pessoa. Para isso, é escolhido um fator de multiplicação individual para cada robô, e esse fator é aplicado aos sinais de força e conjugado

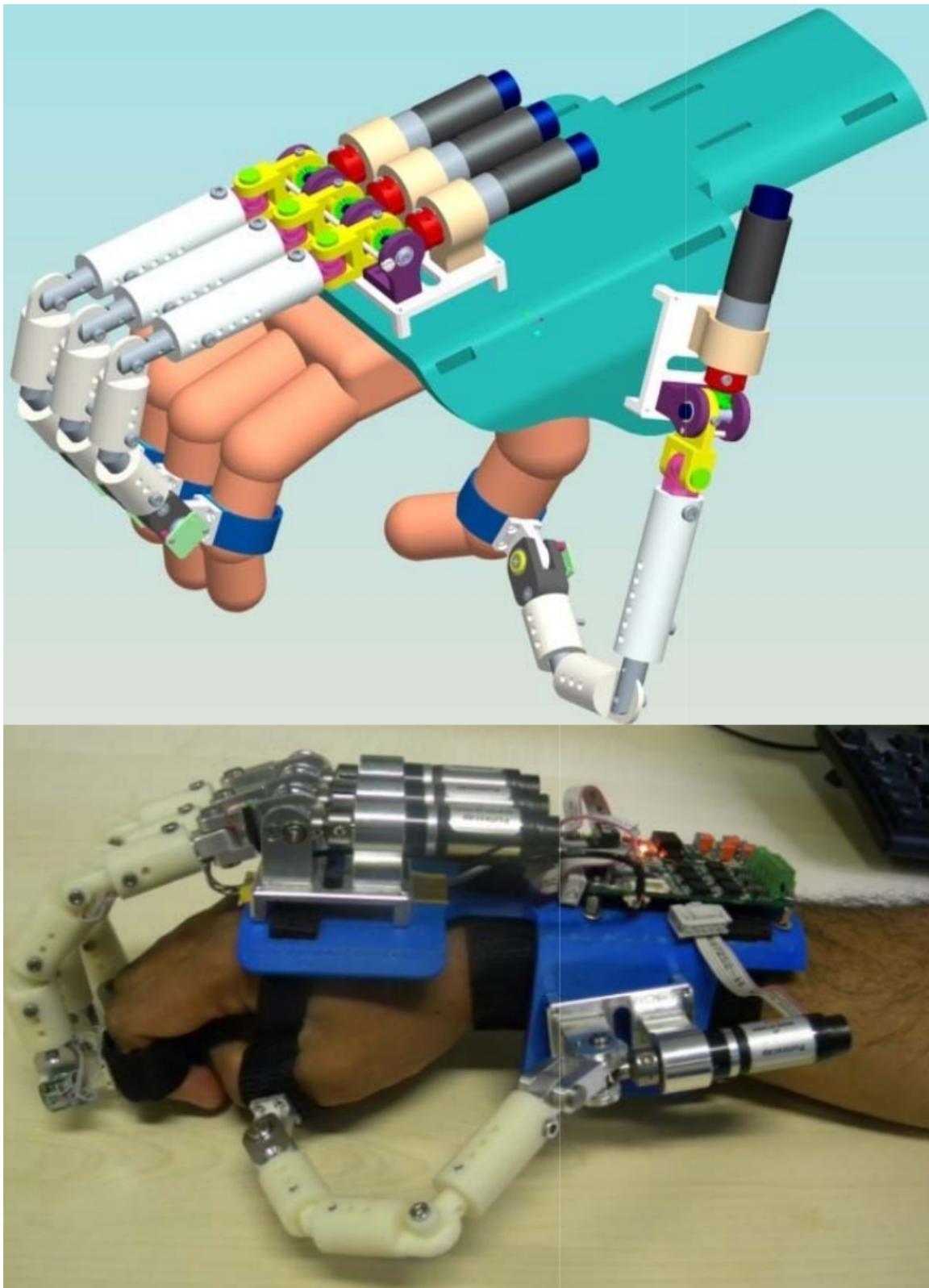


Figura 2.7: Modelo da luva exoesqueleto produzida por Iqbal [39] para auxílio à tratamentos fisioterápicos. Reproduzida de Iqbal [39].

impostos pela pessoa sobre o objeto em deslocamento. Nessa estratégia, a matriz de massa do objeto, bem como seus elementos viscosos, de Coriolis, centrífugos e os elementos conservativos, passam a ser percebidos pela mão da pessoa como sendo divididos pela soma dos fatores de multiplicação de força escolhidos para cada robô, tal como mostrado na equação 2.5.

$$\begin{aligned}
 \sum F_{ext} &= M(q, \dot{q}) \cdot \ddot{q} + b(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + k(q, \dot{q}) \\
 \Rightarrow F_h + F_{robo1} + F_{robo2} + \dots + F_{robon} &= \\
 F_h + \alpha_1 \cdot F_h + \alpha_2 \cdot F_h + \dots + \alpha_n \cdot F_h &= M(q, \dot{q}) \cdot \ddot{q} + b(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + k(q, \dot{q}) \\
 \Rightarrow F_h &= \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n} \cdot [M(q, \dot{q}) \cdot \ddot{q} + b(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + k(q, \dot{q})] \\
 (2.5)
 \end{aligned}$$

onde: $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ são os fatores de multiplicação de força de cada robô.

Essa estratégia de multiplicação de forças é conveniente por reduzir o esforço desenvolvido pelo ser humano mas, como mostrado na equação 2.5, a redução da força imposta pela pessoa por uma única constante de proporcionalidade imposta a todos os parâmetros da impedância equivalente do sistema pode levar também a um sistema sub-amortecido, uma vez que a constante de amortecimento viscoso também é reduzida. Nesse cenário, transitórios de força impostos pela pessoa podem levar a oscilações do objeto deslocado com uma sensação desagradável ao toque da pessoa que comanda o sistema. Seria interessante se avaliar uma alternativa com controle ativo separado das constantes de massa, mola e amortecedor.

Hirata *et al* [33] apresentam um sistema multi-robôs destinados à ajudar uma pessoa no transporte de objetos. Cada robô é denominado por “Dr. Helper” e o mesmo é constituído por uma base omni-direcional, a qual é equipada com sensores de força e conjugado para os 3 eixos, um braço de suporte à carga, e 4 servoacionamentos individualmente dedicados às 4 rodas. Os sensores mencionados detectam a intenção de movimento da pessoa que toca o objeto sobre deslocamento. Esses sinais são então aplicados ao sistema de controle, o qual faz com que o Dr. Helper emule a operação de um caster (ou “roda louca”), similar à roda aplicada a carrinhos de supermercado. Assim sendo, o robô é capaz de se transladar e rotacionar controladamente através de malhas para regulação das velocidades de translação e de rotação. A dinâmica dessas velocidades é controlada através de coeficientes de amortecimento viscoso equivalentes, os quais são alterados em tempo real de acordo com a velocidade de translação. Para velocidades de translação mais altas, o coeficiente equivalente para o atrito viscoso para rotação é também aumentado, de tal forma que perturbações de forças perpendiculares ao movimento não provo-

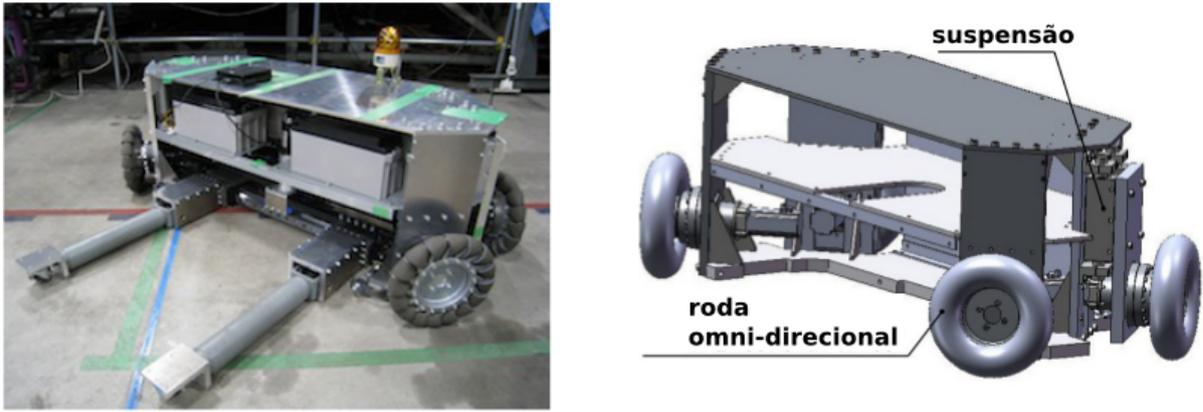


Figura 2.8: Foto e modelo do iCART aplicado para transporte cooperativo de carga através de múltiplos robôs. Desenvolvido e reproduzido de Kashiwazaki [43].

quem guinadas significativas. Por outro lado, valores altos para o coeficiente de atrito viscoso não favorecem manobras em movimentos de posicionamento mais fino. Assim sendo, quando o sistema se encontra à baixa velocidade, o coeficiente de atrito viscoso para rotação é reduzido.

Kashiwazaki *et al* [43] apresentam e constroem um sistema de cooperação homem-robô similar ao Dr. Helper, porém denominado por iCART - “Intelligent Cooperative Autonomous Robot Transporters” . O iCART também é constituído por um sistema multi-robôs, sendo cada um deles dotado de uma base omni-direcional. A fotografia de um iCART é mostrada na Figura 2.8.

O sistema de controle do iCART é constituído por um líder, o qual pode ser uma pessoa ou outro iCART, e diversos iCARTs escravos. Considerando que o sistema multi-robôs transportem um corpo rígido, há restrição holonômica de posição dos escravos com relação ao líder. Baseado nessa restrição e na posição do robô líder, estima-se, de maneira descentralizada, qual é o erro de posição de cada escravo. Baseado nesse erro, ocorre a atuação de correção, favorecendo o transporte do objeto ao ponto desejado.

Sistemas como o Dr. Helper e o iCART são alternativas interessantes para o transporte de objetos mais pesados do que aqueles alocados às mochilas dos exoesqueletos. Além disso, esses sistemas favorecem a segurança do usuário pois, ao contrário do exoesqueleto, eventuais falhas no robô poderão ser percebidas pelo usuário e o mesmo terá mais tempo para evitar lesões em seu corpo. No caso de exoesqueletos, a distância do usuário ao robô é muito próxima e o tempo para reação da pessoa é, portanto, mais curto.

Destaca-se porém que o Dr. Helper e o iCART apresentam dificuldades inerentes de controle devido ao deslizamento dos pneus. Como os mesmos não são paralelos, exige-se um controle de alta precisão para que uma das rodas não deslize pelo efeito da outra roda. Assim

sendo, tais sistemas demandam 4 servo-acionamentos por robô. Na época de realização da presente tese, um servoacionamento de 1,5cv, com resolver, custa aproximadamente R\$11.000,00 ou US\$6.000,00. Portanto, um Dr. Helper na potência exemplificada custaria, no mínimo, R\$44.000,00 ou US\$24.000,00. Tal custo inviabilizaria o seu uso em diversos cenários, tais como a construção civil, as atividades rurais de pequenos e médios produtores, os catadores de resíduos recicláveis, os galpões de suprimentos de pequenas empresas, bem como o uso por pessoas em atividades cotidianas. Para que o Vecarr seja então viabilizado nos cenários mencionados, seria interessante construí-lo aplicando um acionamento mais barato e/ou reduzir o número de acionamentos embarcados no robô.

A redução no número de acionamentos embarcados leva à sub-atuação do Dr. Helper. Esse não seria um problema em diversas tarefas onde, na maior parte do tempo, o sistema implementasse o movimento de translação na direção frontal do robô. Além disso, observa-se que os movimentos de guinada são implementados com aceleração angular imposta pelo condutor do robô e, portanto, seus valores são baixos. Assim sendo, o conjugado demandado para guinada é de baixa amplitude quando comparado ao esforço para transladar o veículo, especialmente em superfícies inclinadas. Essa análise levaria à uma nova versão de custo reduzido do Dr. Helper implementada através de um único motor aplicado às rodas de tração, com rodas de caster não motorizadas destinadas à guinagem. Nessa abordagem, o robô poderia ainda sim se deslocar no plano horizontal, guinar e arfar, tal como o Dr. Helper, porém o movimento de guinada seria desenvolvido com a energia da pessoa.

Pela ausência de contato entre a pessoa e o robô, há também que se contornar o problema de utilizar o Dr. Helper ou o iCART em superfícies inclinadas pois, nesse cenário, a força da gravidade poderia ser interpretada como comando da pessoa que coopera com os robôs, levando assim à deslocamentos indesejados e potenciais riscos de colisão. Tal problema inviabilizaria o uso desses sistemas em obras de construção civil e em atividades de rua, tais como as desenvolvidas por catadores de papel. Nesses cenários, o veículo ou robô de carga frequentemente deve ficar parado em superfícies inclinadas e o mesmo deve permanecer parado sob a ausência de comandos da pessoa. Sugere-se então que o Vecarr poderia seguir a filosofia de operação do Dr. Helper, porém havendo contato entre a pessoa e o robô.

Um veículo cuja a plataforma mecânica possui atuação somente no sentido frontal, com guinagem imposta pelo usuário e com contato entre a pessoa e o robô é o Recicar, desenvolvido por Pujatti e Vale [81] no Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. Nesse trabalho, os autores desenvolveram um cavalo mecânico com tração por motor à combustão, comandos

de conjugado transmitidos por punhal de acelerador, manetes para freio, embreagem e troca de marchas, bem como partida manual. Tal sistema foi entregue aos catadores de papel de Belo Horizonte e o uso do veículo ficou inibido pela dificuldade de pilotá-lo. Porém, dentro do sistema Vecarr, o chassi, sistema de transmissão mecânica e rodas poderiam ser aproveitados, uma vez que tais estruturas possuem montagem compatível às demandas do Vecarr e sua estrutura já foi projetada e construída para operação com carga nominal de 800kg. Aproveitando-se a estrutura mecânica do Recicar, o Vecarr demandaria a instalação do motor elétrico de tração e a construção dos sistemas eletrônicos e de sensoriamento para a utilização do veículo sobre as premissas da cooperação homem-robô, da qual se destaca a capacidade de utilização da potência do robô pelo controle da mente humana e a realização da interface entre os elementos por comandos intuitivos de toque do ser humano.

Mediante a análise apresentada, seria interessante projetar e construir um sistema para deslocamento de cargas que tivesse suas referências de controle geradas pela cooperação com uma pessoa, tal como o Dr. Helper, o qual pudesse ser conduzido de maneira intuitiva por qualquer pessoa, dispensando assim a necessidade de treinamento para condução. Além disso, o sistema poderia possuir rodas paralelas para evitar deslizamentos perpendiculares à direção de movimento, o que reduziria a demanda por sistemas de acionamento de altíssimo desempenho dinâmico e elevado custo. Considerando que a maior parte da energia gasta pela pessoa que coopera com o robô é convertida em movimento de translação, o sistema poderia ter um acionamento dedicado somente a esse movimento. Sob a questão de problemas causados por deslocamentos indesejados sobre efeito da gravidade, a cooperação homem-robô demandaria contato entre a pessoa e o robô. Além disso, para favorecer a produtividade em diversas atividades que demandam deslocamento de cargas maiores que 30kg, seria importante que o sistema pudesse transportar uma carga útil maior que aquela deslocada em exoesqueletos. Um veículo ou sistema de cooperação homem-robô com tais características não é apresentado na literatura científica e, portanto, a sua análise, projeto, construção e comissionamento apresentam oportunidades singulares de contribuição à comunidade científica que trabalha nesse ramo, bem como aos potenciais usuários de tal sistema, os quais não necessitarão comprometer o seu sistema músculo-esquelético às lesões provocadas pelo deslocamento de cargas de dezenas ou centenas de quilogramas. Mediante os benefícios e premissas mencionados, será apresentado no restante da presente tese todas as etapas de desenvolvimento do Vecarr, contemplando as demandas impostas ao veículo por usuários de um ramo específico de atividade, o projeto para especificação dos elementos de potência, a concepção das malhas de controle, o projeto do sistema eletrô-

nico para condicionamento de sinais, as alternativas para atenuação de ruídos e a avaliação de desempenho do protótipo construído. Toda a solução eletrônica será embarcada na estrutura mecânica do Recicar, uma vez que tal veículo já está construído e possui as características de configuração desejadas ao sistema de cooperação homem-robô que será construído.

2.3 Conclusões

Nesse capítulo foi apresentada uma extensa revisão bibliográfica contemplando o estado da arte na tecnologia de detecção da intenção de movimento de seres humanos, bem como na tecnologia dos sistemas de cooperação homem-robô.

Inicialmente foram apresentados os sistemas para detecção da intenção de movimento por eletroencefalogramas, magnetoencefalogramas e eletromiogramas. Tais sistemas possuem custo proibitivo para aplicação ao Vecarr em diversos cenários, bem como demandam mão de obra especializada e conexão de cabos à pessoas para instalação dos sensores. Portanto, o uso dos mesmos foi descartado para a versão do Vecarr desenvolvida nessa tese de doutorado.

Avaliou-se também a detecção de intenção de movimento através dos sistemas de direção elétrica. Em tais sistemas, são aplicados sensores de conjugado dedicados ou utiliza-se da corrente dos motores que auxiliam na guinagem de barras de direção para se detectar a intenção do usuário. Pesquisas desenvolvidas nessa tese mostraram que a detecção da intenção de movimento através da corrente elétrica do motor de tração é muito difícil de ser feita porque a força humana é pequena frente ao esforço produzido pelo acionamento elétrico. Além disso tal força, quando refletida ao eixo do motor pela transmissão mecânica, possui sua amplitude atenuada por um valor igual à razão de transmissão. Assim sendo, o distúrbio provocado pela força humana ao sinal de corrente se confunde com o próprio ruído do sistema de medição. Para aumentar a razão sinal/ruído, demanda-se esforço excessivo do condutor, tanto para partida quanto para frenagem. Tal situação não atende à dirigibilidade intuitiva do Vecarr, a qual é uma das premissas dessa tese. Além disso, tal situação é perigosa, pois o veículo pode não frear mediante o primeiro comando do usuário. Assim sendo, também descartou-se o sensoriamento da intenção de movimento pela corrente elétrica do motor de tração.

Dentre as opções apresentadas, observou-se que os sistemas para cooperação homem-robô utilizam, geralmente, a transdução de força através de células de carga ou strain-gages. Tais tecnologias são consolidadas, com ampla gama de fabricantes e dedicadas a diversos cenários. Assim sendo, será utilizada uma célula de carga para detecção da intenção de movimento do condutor do Vecarr.

Para os sistemas de cooperação homem-robô, foi apresentada a modelagem dos elementos de atuação - homem, robô e elementos externos - sobre a carga que se deseja deslocar, e a forma como o sistema de controle do robô pode ser ajustada para que ele transmita ao usuário que o toca diferentes sensações, as quais são parametrizáveis pela emulação do sistema massa-mola-amortecedor equivalente para o robô. Mostrou-se também como tais parâmetros de impedância mecânica podem ser ajustados para transmitir qualidade ao contato humano, e como tal indicador pode ser alcançado quando o sistema é simultaneamente flexível, agradável, tranquilizante e com comportamento similar ao toque humano. Foram avaliadas também as soluções apresentadas em sistemas de cooperação onde o ser humano veste a estrutura robótica. Tais sistemas são chamados de exoesqueletos, e de tais trabalhos foram extraídos os modelos para o contato homem-robô, bem como ideias para o sensoriamento da força transmitida pelo ser humano. Para o deslocamento de cargas sem vestimento da estrutura robótica por pessoas, avaliou-se as características do Dr. Helper e do iCART. Apesar de tais sistemas possuírem diversas características de interesse ao projeto Vecarr, observou-se que a sua montagem demanda um sistema multi-robôs, com 4 servo-acionamentos por robô, o que deixa o custo da solução demasiadamente alto. Além disso, constatou-se que tais sistemas possuem dificuldades inerentes para operação em plataformas inclinadas, uma vez que a força e conjugado impostos por elementos externos a cada Dr. Helper são aplicadas por contato com o objeto, e não com o usuário. Assim sendo, se tais sistemas operarem em plataformas inclinadas, é difícil distinguir entre forças externas aplicadas pelo usuário ou pela gravidade.

Das conclusões extraídas pela revisão bibliográfica, delimitou-se as premissas que um novo veículo para deslocamento de cargas deveria possuir para ter contribuições científica e social efetivas: condução intuitiva pelo usuário, contato com o veículo, acionamento elétrico atuador baseado a inversor de frequência e máquina de indução, guinagem imposta pelo usuário e sistema de tração com rodas paralelas para evitar deslizamento. Observou-se também na comunidade científica que um veículo cuja estrutura mecânica é facilmente adaptável às premissas apresentadas é o Recicar, desenvolvido no Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. Considerando então a contribuição científica inovadora de um sistema para deslocamento de cargas construído sob tais premissas, bem como a contribuição à vida de diversos profissionais que trabalham com deslocamento de cargas, serão apresentados nos próximos capítulos as etapas para o desenvolvimento completo do Vecarr.

Capítulo 3

Especificação dos elementos de potência do veículo

Apesar da possibilidade de aplicação do Vecarr em diversos contextos que demandam a cooperação homem-robô, há diferenças quanto às demandas de conjugado, potência e consumo de energia em cada aplicação. Em alguns cenários, tais como obras de construção civil, o veículo circula em um espaço restrito, ao qual o usuário pode lançar mão de um novo banco de baterias tão logo o sistema se descarregue. No caso de catadores de papel, porém, o banco de baterias tem que possuir energia embarcada suficiente para toda a jornada de trabalho, uma vez que o catador só teria disponibilidade para acessar outro banco ou mesmo recarregar o banco existente quando retornasse ao galpão. Nesses dois exemplos, destacam-se as demandas por diferentes níveis de carga nas baterias embarcadas ao Vecarr.

Quanto à massa transportada, percebe-se que estivadores de portos ou funcionários de construção civil carregam sacos e latas com massas típicas de 50 a 100kg. Já os catadores de papel transportam, ao final de sua jornada, massas típicas de 500kg. Mochilas escolares de crianças ou pertences de idosos, por sua vez, terão massas típicas de 1 a 20kg. Todos esses cenários seriam favorecidos pelo uso do Vecarr, porém a demanda de conjugado imposta ao veículo é consideravelmente diferente para cada caso. Assim sendo, sob uma ótica de eficiência do motor de tração, seria adequado se equipar o veículo com motores personalizados a cada aplicação.

Para motores de diferentes números de pólos e alimentados com inversor de frequência, uma dada demanda de conjugado na roda do veículo pode ser atendida por uma ampla gama de redutoras mecânicas instaladas entre o motor e a roda. Assim sendo, de acordo com a demanda de conjugado da aplicação, da disponibilidade de conjugado do motor e da opção em se operar

tal motor na sua região de máxima eficiência, é necessário se escolher a redutora mecânica mais adequada a cada cenário.

Mediante os problemas tecnológicos apresentados, este capítulo apresenta uma metodologia para especificação dos elementos de potência que irão equipar o veículo. Para ilustrar a aplicação da metodologia, será utilizado como cenário-exemplo a rotina de trabalho dos catadores de papel de São João del Rei. Como as aplicações-alvo do Vecarr possuem, em sua maioria, restrições orçamentárias severas, o sistema de potência do veículo será baseado na máquina de indução com rotor em gaiola acionado por inversor de frequência comercial dotado de firmware para controle vetorial. Se os veículos dotados com esse sistema de acionamento possuírem desempenho adequado, a utilização dos mesmos será uma alternativa interessante para redução de custo frente ao acionamento baseado em servoacionamento que é tipicamente empregado nas cooperações homem-robô.

A metodologia mostrada nesse capítulo é baseada na simulação de acionamentos que desempenhem as mesmas trajetórias impostas pelos condutores do veículo. Sob essa ótica, o pacote de simulação desenvolvido é prontamente disponível para qualquer cenário onde se deseja especificar os elementos de potência do veículo, sendo necessário mudar somente os dados de entrada. Para aquisição desses dados de entrada é necessário se fazer o sensoriamento de diversos sinais do condutor e do veículo em suas jornadas reais de trabalho. Como contribuição a essa atividade de sensoriamento, o presente capítulo também apresenta uma alternativa interessante para a redução na quantidade de sensores embarcados para avaliação do conjugado de carga imposto à roda do veículo.

3.1 Metodologia para levantamento de trajetórias mecânicas e forças externas aplicadas ao Vecarr

3.1.1 Sistema de aquisição de dados

Como cenário exemplo da metodologia de especificação dos elementos do Vecarr, foi monitorada a rotina real de 13 dias de trabalho dos catadores de papel de São João del Rei. Como ao final se deseja obter os elementos de potência do veículo e os mesmos terão que reproduzir a mesma força de tração que o seu condutor real faria, deve ser medido esse sinal de força. Para essa atividade, foi utilizado uma célula de carga alocada entre duas barras. Uma das barras é presa ao veículo por braçadeiras e a outra recebe o contato da pessoa que conduz o veículo. Tal célula de carga possui limite máximo de 100kgf e portanto, mediante as componentes de



Figura 3.1: Arranjo de montagem da célula de carga ao veículo durante o monitoramento da rotina de catadores de papel.

carga e aceleração impostas pela pessoa, a mesma é adequada à medição do sinal de força. Para torná-la prontamente adaptável a qualquer veículo, destaca-se a opção de prendê-la por braçadeiras. A Figura 3.1 mostra uma ilustração de como a célula de carga foi presa ao veículo e como ela recebeu o sinal de força da pessoa.

Além disso, a componente de força de carga da gravidade no sentido de deslocamento do veículo, a qual é a maior componente de força em aplicações onde o mesmo circule em área inclinadas, depende do ângulo de inclinação da superfície e da massa embarcada. Para então reproduzir tais componentes em simulação, é necessário se empregar um altímetro e se caracterizar o perfil de massa no tempo. O altímetro empregado opera sob a medição da pressão atmosférica e possui erro de 17cm, o que é suficiente para estimativas de potência onde a energia potencial gravitacional é caracterizada por variações maiores que 10m para deslocamentos na rua.

Quanto ao perfil da massa no tempo, não havia balança disponível durante as jornadas de trabalho monitoradas, e o mesmo foi obtido através do armazenamento em sacos plásticos numerados das massas embarcadas a cada parada do veículo. Ao se anotar o número do saco plástico, registrar a hora em que ele foi embarcado e pesando-o ao final da jornada, tem-se configurado o perfil de massa no tempo.

Para a simulação do acionamento que aplicaria a mesma força de tração que o condutor aplicou ao sistema, também é necessário se monitorar a velocidade do veículo. Como foram monitorados mais de um veículo, seria inconveniente medir a velocidade com encoder ou tacômetro, pois os mesmos demandam intervenções mecânicas no eixo da roda para se tomar as medições. Assim sendo, foi utilizado um GPS com taxa de amostragem igual a 5Hz e erro de

medição limitado a 5cm/s. Como a maior parte da potência é consumida na velocidade média de deslocamento dos condutores, a qual é tipicamente da ordem de 1m/s, o erro embutido na medição do GPS é pouco significativo na estimativa das potências de tração envolvidas na aplicação. Destaca-se também que, nessa abordagem, não é necessário se fazer adaptações mecânicas para medição de velocidade, sendo necessário somente embarcar o GPS no veículo. Além disso, a dinâmica de variação da velocidade imposta pelos condutores é menor que a taxa de amostragem de 5Hz e, portanto, tal taxa de amostragem é adequada para reprodução do sinal de velocidade em ambiente computacional.

A aquisição de todos os sinais mencionados foi realizada através de uma unidade integrada de sensoriamento desenvolvida pelo Centro de Estudos Aeronáuticos por Iscold [40] e denominada CEAFDASu - “Centro de Estudos Aeronáuticos Flight Data Acquisition System micro”. O CEAFDASu foi originalmente construído para estudos em aeronáutica mas como o Vecarr é um corpo no espaço, tal como o avião, é possível adquirir os sinais de trajetória mecânica e força externa pertinentes ao estudo. O CEAFDASu é alimentado por bateria alcalina de 9V, uma unidade para regulação de tensão com saída a 5V, um microprocessador PIC modelo 16F877P, unidades para condicionamento de sinais, um gravador de memória flash para armazenamento não-volátil dos dados adquiridos e entradas analógicas para interface de dados com os sensores. Por parte do PIC, a operação do CEAFDASu consiste em uma amostragem dos sinais dos sensores à 20Hz, processamento desses sinais e síntese de uma palavra de informação com todos os sinais amostrados, os quais são então transmitidos ao gravador de memória flash. Todos os sinais monitorados já possuem sensores e unidades de condicionamento embutidos no encapsulamento do CEAFDASu, com exceção à célula de carga, a qual não é normalmente usada em estudos de aviões. Assim sendo, foi montada uma estrutura para condicionamento de sinais da célula de carga baseada à amplificador de instrumentação. Não foram necessárias soluções dedicadas a eliminação de ruídos diferenciais ou de modo comum, uma vez que o veículo circulou nas ruas, contendo portanto acoplamento em modo diferencial por campo magnético em 60Hz com fluxo no ar. Além disso, não havia fontes de ruído de modo comum operando com alto dV/dt , tal como ocorre em conversores com sinais de PWM. A estrutura em diagrama de blocos do CEAFDASu é apresentada na Figura 3.2.

Para conduzir o experimento, o sistema mostrado na Figura 3.2 e o arranjo da célula de carga mostrado na Figura 5.10 foram embarcados no Vecarr, tal como mostrado nas fotografias das figuras 3.3, 3.4 e 3.5. Cada catador foi instruído a fazer o seu circuito cotidiano para coleta de materiais, inclusive puxando ou empurrando o veículo da maneira intuitiva que ele

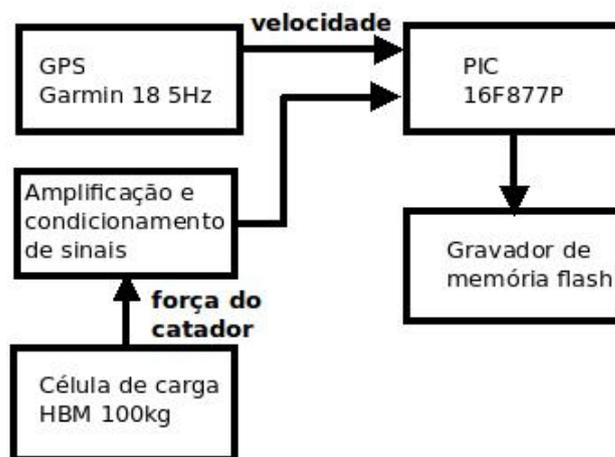


Figura 3.2: Diagrama de blocos contendo a interface de sinais do sistema de aquisição de dados CEFADSu utilizado para aquisição de dados na rotina de catadores de papel.



Figura 3.3: Fotografia dos componentes eletrônicos embarcados para registro dos sinais de força e trajetória dos catadores.

sempre fez. A única restrição era que a sua força fosse aplicada à barra de contato, para que a célula de carga conseguisse registrar tal sinal. Dessa maneira, foram monitorados 13 jornadas de trabalho, compondo-se uma base de dados com os sinais mencionados. Tais sinais foram então aplicados como dados de entrada à uma plataforma de simulação de acionamentos elétricos baseados à máquina de indução. Tais simulações foram configuradas para que as máquinas simuladas reproduzam as mesmas forças e as mesmas trajetórias mecânicas medidas pelo CEFADSu nas jornadas de trabalho monitoradas. Com as saídas dessas simulações é possível se escolher o acionamento conveniente para a tração do carrinho dos catadores. Tal escolha ou a especificação dos elementos de potência é apresentada nas próximas seções.

Além da aplicação na metodologia de especificação dos elementos de potência, destaca-se



Figura 3.4: Fotografia GPS embarcado ao veículo dos catadores de papel.



Figura 3.5: Fotografia da barra de comandos e célula de carga embarcados ao veículo dos catadores de papel.

que os dados coletados constituem uma contribuição como base de dados para profissionais da área de saúde, tais como educadores físicos, fisioterapeutas e ortopedistas, os quais poderiam utilizar as informações de força e velocidade dos catadores e correlacioná-las com as enfermidades típicas observadas nesses pessoas; bem como para profissionais da secretaria de meio ambiente do município, os quais poderiam diagnosticar os locais para obtenção de material reciclável; bem como por geógrafos, os quais precisassem de informações topológicas dos locais monitorados.

3.2 Especificação do motor elétrico

3.2.1 Avaliação dos critérios de conjugado médio quadrático e potência média quadrática para especificação da máquina de indução adequada ao Vecarr

A especificação de um elemento de potência possui como premissa o atendimento ao cliente da aplicação. Como o motor elétrico é uma fonte de conjugado, ele deve atender ao conjugado demandado pela aplicação cliente. Os conjugados de diversas aplicações industriais são descritos por ciclos padronizados de trabalho e, portanto, a especificação dos motores adequados a essas aplicações também é normatizada.

Tal como apresentado por Júnior [42], dois critérios normatizados utilizados para a especificação de motores são o critério do conjugado e da potência. No critério do conjugado, é obtido o conjugado médio quadrático da aplicação. Para utilizar o método, é necessário levantar os tempos de duração e os níveis de conjugado de um ciclo de trabalho, tal como ilustrado na Figura 3.6, e aplicar esses valores à equação 3.1.

$$T_{e,rms} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \cdot \int_0^{T_0} T_e(t)^2 \cdot dt} \quad (3.1)$$

A utilização do método do conjugado quadrático se justifica para máquinas de grande porte, ou máquinas de especificação nominal maior que 10cv. Esse argumento se justifica pela faixa típica dos parâmetros do circuito equivalente para máquinas de indução de grande porte, tal como apresentado por Cardoso [17] e reproduzido na Tabela 3.1.

Quando os parâmetros da Tabela 3.1 são aplicados ao circuito equivalente em regime permanente da máquina de indução, tal como apresentado na Figura 3.7, é possível simplificar tal circuito para o formato apresentado na Figura 3.8. Tal simplificação se justifica porque

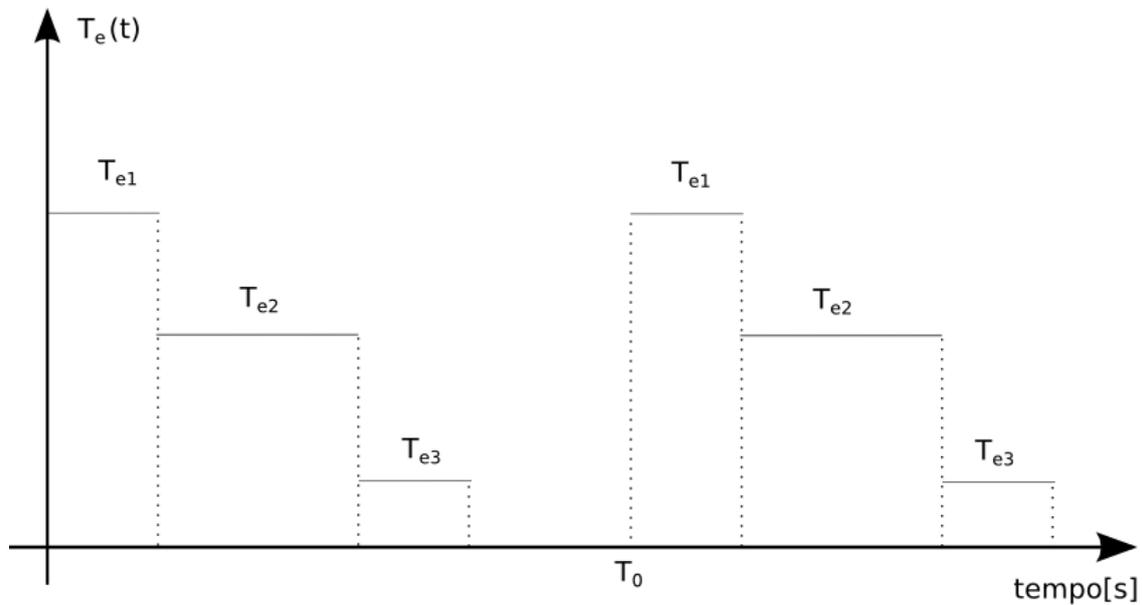


Figura 3.6: Ilustração do conjugado demandado em um ciclo de trabalho de uma aplicação genérica.

Tabela 3.1: Faixas típicas dos parâmetros do circuito equivalente para máquinas de indução de grande porte (potência nominal maior que 10cv).

Parâmetro	Faixa típica do parâmetro em pu
r_s	0,005 a 0,05
r_r	$1,2.r_s$
$L_{Ls} + L_{Lr}$	0,15 a 0,25
M	3,0 a 4,0
r_{Fe}	50 a 100

o termo de conversão de energia para os escorregamentos típicos de operação bem como a indutância de magnetização são muito maiores que as impedâncias dos demais elementos do circuito equivalente.

A partir do circuito mostrado na Figura 3.8, observa-se que a reatância de magnetização é cerca de 3 vezes maior que o termo rr/s nas proximidades do ponto nominal de operação. Portanto, para uma dada tensão de estator aplicada a ambas impedâncias, a corrente do motor será basicamente igual à corrente i_r . Como essa corrente é proporcional ao escorregamento, e o escorregamento é proporcional ao conjugado de carga, tem-se que a corrente de estator da máquina é proporcional ao conjugado de carga. Como as perdas por efeito Joule no cobre do estator e rotor são as maiores contribuições para as perdas totais da máquina, e tais perdas são proporcionais ao quadrado da corrente de estator, tem-se que as perdas em uma máquina de grande porte são proporcionais ao quadrado do conjugado de carga. Assim sendo, a determinação do conjugado médio quadrático permite se determinar qual nível de conjugado que,

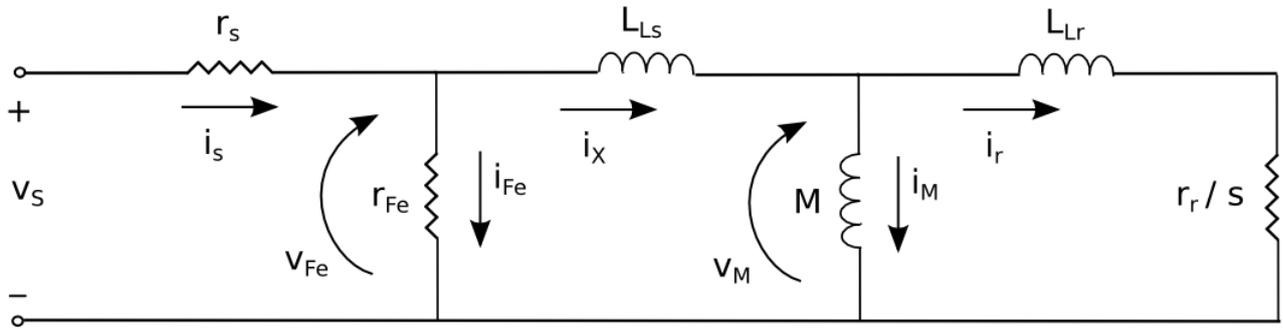


Figura 3.7: Circuito equivalente em regime permanente da máquina de indução trifásica.

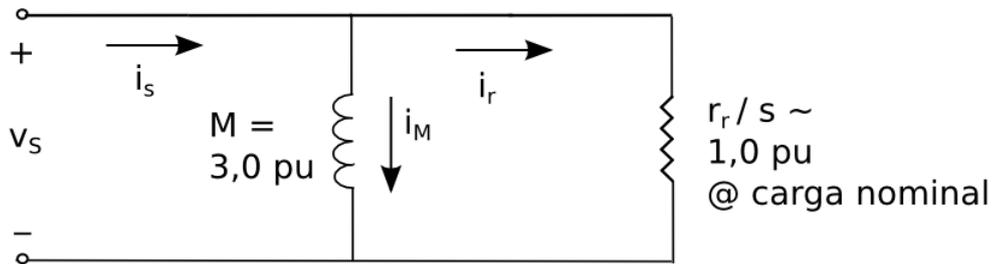


Figura 3.8: Circuito simplificado para a máquina de indução maior que 10cv em regime permanente.

constantemente aplicado no eixo de uma máquina, levaria às mesmas perdas que o ciclo de carga mostrado na Figura 3.6. Se for então escolhida uma máquina cujo conjugado nominal seja igual a esse conjugado constante, há um indicativo de que sua constituição seja capaz de eliminar o calor típico produzido na aplicação em questão sem exceder o limite de temperatura suportado pelo verniz isolante das bobinas.

O critério da potência média quadrática possui a mesma ideia básica do critério do conjugado médio quadrático, ou seja, obtém-se a partir da potência variável da carga qual é a potência que, constantemente aplicada à máquina, levaria às mesmas perdas produzidas pela potência cíclica variável. Esse nível de potência constante determina, então, a potência nominal do motor. O cálculo da potência média quadrática é feito através da equação 3.2.

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \cdot \int_0^{T_0} P_{carga}(t)^2 \cdot dt} \tag{3.2}$$

Observa-se que os critérios do conjugado médio quadrático e da potência média quadrática se baseiam na aproximação de se igualar a corrente de estator à corrente de rotor, o que ocorre pelo alto valor da indutância de magnetização. Para máquinas de pequeno porte, ou seja, menores do que 10cv, as indutâncias de magnetização são baixas e, portanto, tais métodos não

são eficientes. Se os critérios mencionados forem aplicados a máquinas de pequeno porte, as perdas no cobre serão subdimensionadas, e o motor poderá se queimar antes do tempo de vida útil previsto pelo fabricante.

No caso do Vecarr, o veículo tem que se deslocar em uma velocidade igual àquela imposta pela caminhada de seu condutor. A carga deslocada varia entre aplicações, mas na aplicação tomada para exemplificar a metodologia, será considerada uma massa nominal de 500kg. Tal massa, em um veículo com rodas e deslocada à velocidade humana de caminhada, poderia ser tracionada por um cavalo. Fazendo analogia à unidade de potência, um motor com potência nominal próxima a 1cv seria apropriado à aplicação. Assim sendo, como o motor da aplicação será menor que 10cv, a especificação do mesmo não seria bem feita pelos critérios de conjugado médio quadrático e potência média quadrática.

3.2.2 Critérios para o dimensionamento da máquina de indução adequada ao Vecarr

Para garantir o controle do sistema com bom desacoplamento de componentes vetoriais e conseqüentemente boa resposta dinâmica, bem como garantir que o motor não se queime durante os ciclos de trabalho, será selecionado para a aplicação o motor elétrico que consuma menos energia para desempenhar o trabalho desenvolvido nos ciclos monitorados e que atenda simultaneamente às três condições apresentadas a seguir:

- o motor deverá possuir conjugado máximo maior que o máximo conjugado da aplicação;
- para operação com inversor de frequência em modo de controle vetorial, o conjugado máximo da aplicação deverá estar na região linear entre corrente de estator e conjugado eletromagnético;
- A temperatura do motor não poderá exceder o valor máximo determinado por sua classe de isolamento.

Para poder comparar o desempenho de diversos motores sob os critérios listados, serão escolhidos motores candidatos e o desempenho dos mesmos será avaliado por simulações. Para executar o algoritmo de simulação, é necessário obter os parâmetros do circuito equivalente de cada máquina. Tais valores não são fornecidos pelos fabricantes e não é economicamente viável comprar todos os motores que se deseja testar, para então realizar os ensaios à vazio e de rotor bloqueado. A solução para tais estimativas é apresentada na próxima seção.

Tabela 3.2: Correlação entre os parâmetros do circuito equivalente da máquina e as grandezas mais sensíveis ao mesmos.

Parâmetro do circuito equivalente	Grandeza ou estado da máquina mais sensível ao parâmetro
r_r	Conjugado eletromagnético e potência nominais
L_{Ls}	Conjugado eletromagnético máximo
L_{Lr}	Conjugado eletromagnético máximo
M	Fator de potência
r_s	Corrente de estator
r_{Fe}	Eficiência

3.2.3 Estimativa dos parâmetros dos circuitos elétricos equivalente das máquinas de indução propostas para o Vecarr.

Como não é viável comprar todas as máquinas candidatas ao acionamento do Vecarr para então levantar os parâmetros de seus circuitos equivalentes, e como os mesmos não são disponibilizados na literatura científica, serão utilizadas as metodologias propostas por Cardoso [17] e Assunção [4] para levantamento dos parâmetros do circuito equivalente através dos dados de placa dos motores.

Nessa metodologia, os autores identificaram qual estado físico - corrente ou escorregamento - ou qual grandeza da máquina - potência, eficiência e fator de potência - possui mais sensibilidade à alterações nos parâmetros do circuito equivalente. As correlações são apresentadas na Tabela 3.2.

Para a aplicação do método de levantamento de parâmetros do circuito equivalente, são arbitrados valores iniciais para os mesmos. Para acelerar a convergência do método, geralmente são utilizados como parâmetros iniciais os valores típicos encontrados para os mesmos em máquinas de grande porte, tais como mostrados na Tabela 3.1. Após essa escolha, é executado o algoritmo para simulação da máquina de indução em regime permanente através do circuito apresentado na Figura 3.7. Nesse circuito são impostos a tensão e frequência nominais, bem como o escorregamento, o qual é variado desde o rotor bloqueado até a velocidade síncrona. As grandezas e estados físicos do motor são armazenados para cada escorregamento imposto e os mesmos são traçados juntamente com os pontos nominais de operação. O método se completa quando as curvas das grandezas da máquina passam pelos pontos nominais de operação.

Geralmente os parâmetros iniciais atribuídos ao circuito equivalente do motor em questão não se configuram como representativos, uma vez que nenhuma das curvas passa pelo ponto nominal determinado na placa do motor. As estimativas de parâmetros são então refinadas até

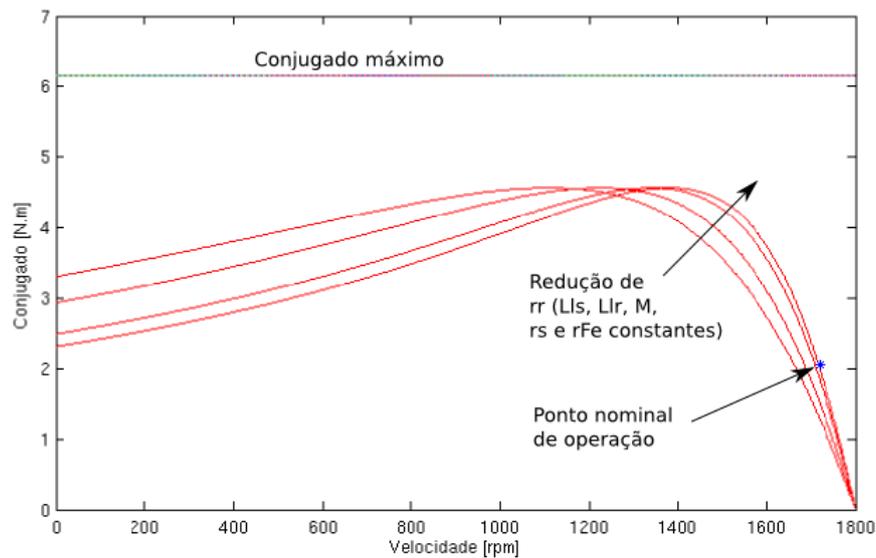


Figura 3.9: Conjugado eletromagnético x velocidade para tentativas de estimação das resistências de rotor do motor WEG alto rendimento 370W, 220V, 4 pólos.

que todas as curvas passem pelos pontos nominais.

No primeiro passo de refinamento, a resistência de rotor é alterada até a curva de conjugado eletromagnético e de potência de estator passarem pelos respectivos pontos nominais. Tal como mostrado na Tabela 3.2, o conjugado e a potência são os parâmetros mais sensíveis à alterações na resistência de rotor. Alterando-se unicamente a resistência de rotor, são obtidas uma sucessão de curvas características de conjugado e potência. Tomando a máquina candidata de 370W, 4 pólos como exemplo, a sobreposição de tais curvas características são apresentadas nas figuras 3.9 e 3.10.

Após a curva de conjugado eletromagnético sobrepôr o ponto nominal de placa com um erro máximo de 2 %, as indutâncias de dispersão de rotor e estator são refinadas até que o ponto de máximo conjugado eletromagnético coincida com o conjugado máximo especificado em placa. No próximo passo é ajustado o fator de potência nominal através de alterações na indutância de magnetização. Em sequência, altera-se a resistência de estator para a sobreposição do ponto de corrente de estator nominal e, por último, altera-se a resistência de perdas no ferro para o ajuste do ponto de eficiência nominal. Como exemplo de aplicação do método, apresentam-se nas curvas das figuras 3.11, 3.12 e 3.13 a sequência de passos mencionada para a estimativa dos parâmetros do circuito equivalente da máquina de 370W, 4 pólos.

Aplicando-se esses passos para todos os motores candidatos, obtém-se os parâmetros equivalentes para os mesmos tal como apresentado na Tabela 3.3.

Após o levantamento dos parâmetros do circuito equivalente, é possível avaliar por simulação qual qual é o desempenho das máquinas candidatas frente aos critérios de especificação

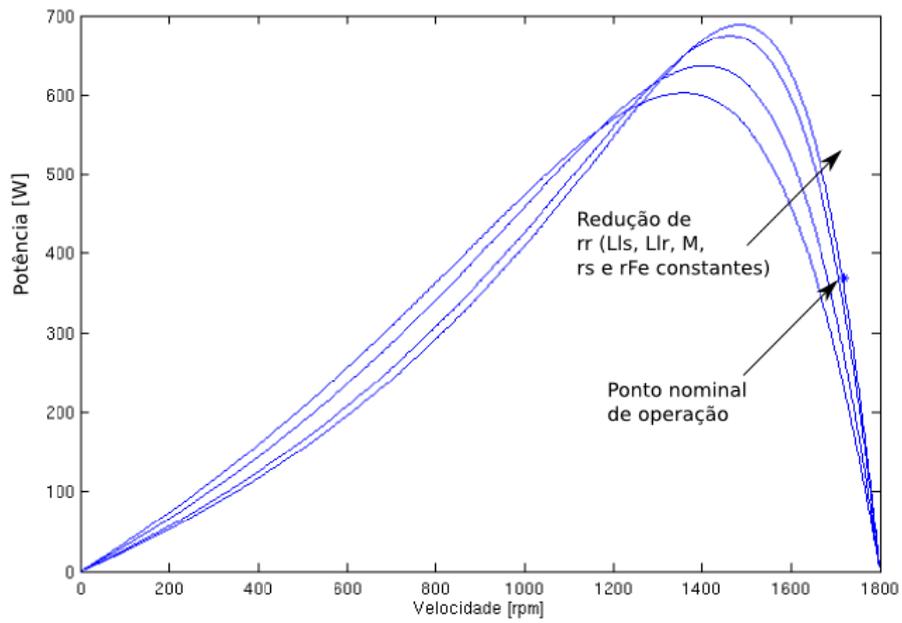


Figura 3.10: Potência de estator x velocidade para as tentativas de estimativa da resistências de rotor do motor WEG alto rendimento 370W, 220V, 4 pólos.

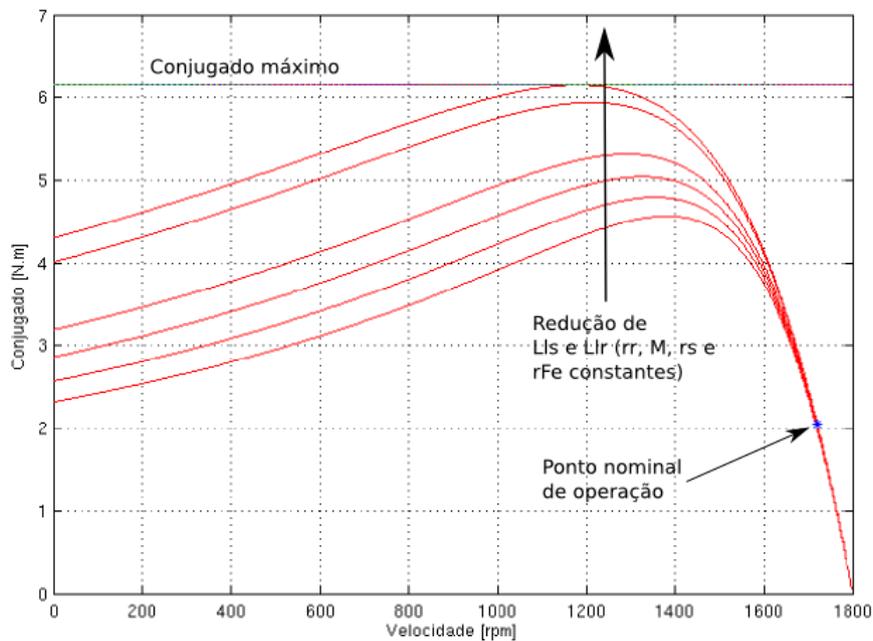


Figura 3.11: Conjugado eletromagnético x velocidade para as tentativas de estimativa das indutâncias de dispersão do estator e rotor do motor WEG alto rendimento 370W, 220V, 4 pólos.

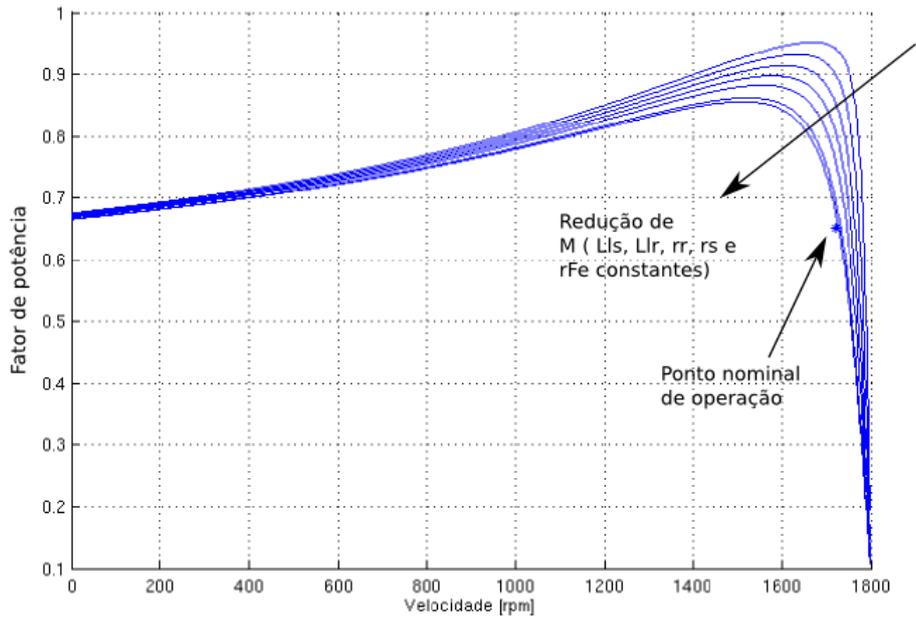


Figura 3.12: Fator de potência x velocidade para as tentativas de estimativa da indutância de magnetização do motor WEG alto rendimento 370W, 220V, 4 pólos.

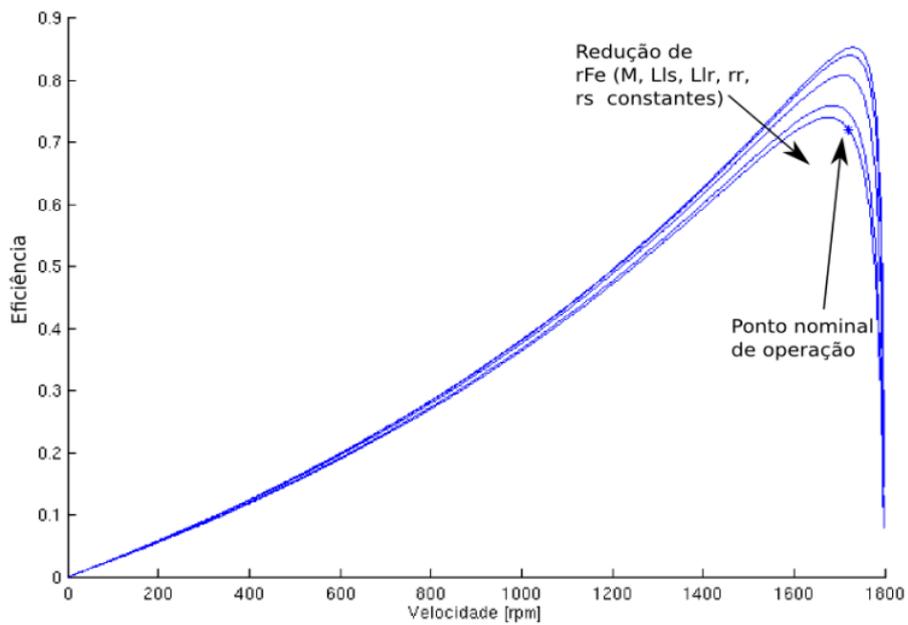


Figura 3.13: Eficiência x velocidade para as tentativas de levantamento da resistência de perdas no ferro para o motor WEG alto rendimento 370W, 220V, 4 pólos.

Tabela 3.3: Parâmetros dos circuitos equivalentes para os motores WEG alto rendimento de 370W, 550W e 750W, contendo 4, 6 e 8 pólos. Todos motores possuem tensão nominal de 220Vrms.

	r_s [Ω]	r_r [Ω]	L_{Ls} [mH]	L_{Lr} [mH]	M [mH]	J [kg.m ²]
370W, 4pólos	1,69	4,43	17,59	26,25	201,9	0,0079
370W, 6 pólos	3,92	3,98	18,39	27,44	190,8	0,0024
370W, 8 pólos	4,31	5,16	21,51	32,11	155,4	0,0054
550W, 4 pólos	2,75	4,44	9,92	14,81	155,5	0,00096
550W, 6 pólos	3,24	2,73	10,69	15,95	129,6	0,00328
550W, 8 pólos	4,68	4,79	12,55	18,74	120,9	0,0056
750W, 4 pólos	2,02	1,94	7,87	11,75	186	0,00328
750W, 6 pólos	2,38	2,13	7,85	11,72	131,8	0,0056
750W, 8 pólos	3,44	2,67	9,5	14,17	88,7	0,63

apresentados.

3.2.4 Avaliação do máximo conjugado disponibilizado pelas máquinas candidatas frente ao máximo nível de conjugado demandado na aplicação

Para garantir que o veículo não seja travado por uma demanda de conjugado maior que o conjugado máximo disponibilizado pelos motores candidatos, foi identificada a máxima demanda de conjugado no eixo da roda do veículo. Tal demanda aconteceu no 2º dia de monitoramento, e seu nível foi de 52N.m. Considerando as razões de transmissão aplicadas aos motores de 4, 6 e 8 pólos, apresenta-se nas figuras 3.14, 3.15 e 3.16 as referências de conjugados eletromagnéticos demandados nos eixos dos respectivos motores para o dia em que houve máxima demanda de conjugado. Tal como mostrado nessas figuras, os níveis máximos de conjugado demandado das máquinas de 4, 6 e 8 pólos foram de 2,6 , 4,9 e 6,5N.m, respectivamente.

Para comparar tais níveis demandados com os máximos conjugados disponibilizados pelos motores candidatos, apresenta-se nas figuras 3.17 a 3.25 as curvas de conjugado eletromagnético x corrente de estator para escorregamentos variando de 0 a 1. Observa-se por tais curvas que apenas as máquinas de 250W não possuem conjugado máximo maior que aquele demandado pelo carga. Portanto, elas serão descartadas como candidatas ao acionamento do Vecarr. Resta ainda avaliar, dentre os motores restantes (370, 550 e 750W), quais serão capazes de acionar a carga sempre mantendo sua operação na região linear entre conjugado eletromagnético e componente de conjugado da corrente de estator. Tal análise é apresentada na próxima seção.

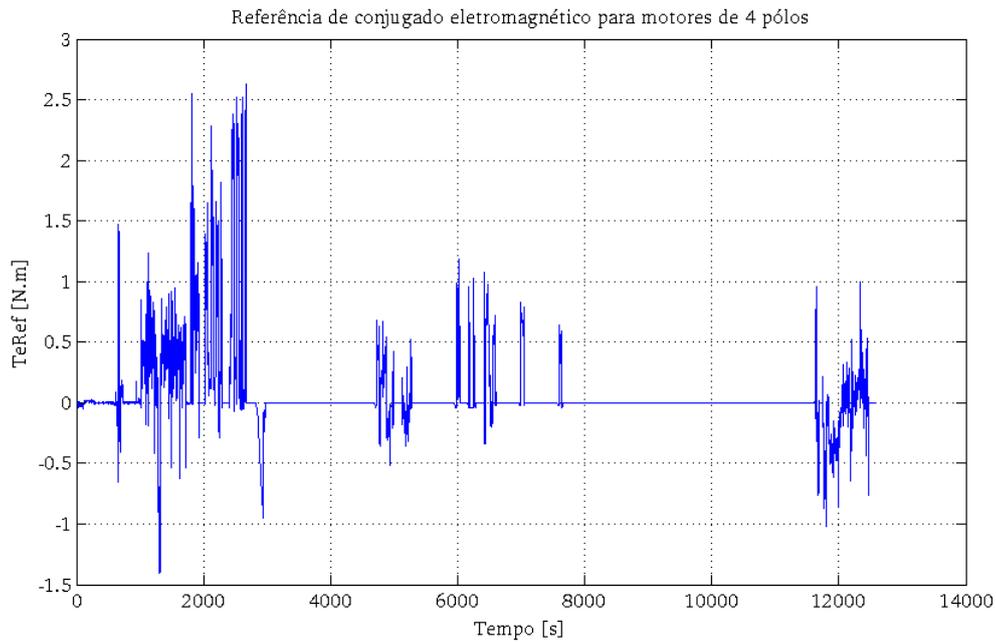


Figura 3.14: Referência de conjugado eletromagnético x tempo para a máxima demanda de conjugado medida na rotina dos catadores de papel e considerando a redutora aplicável à máquinas de 4 pólos.

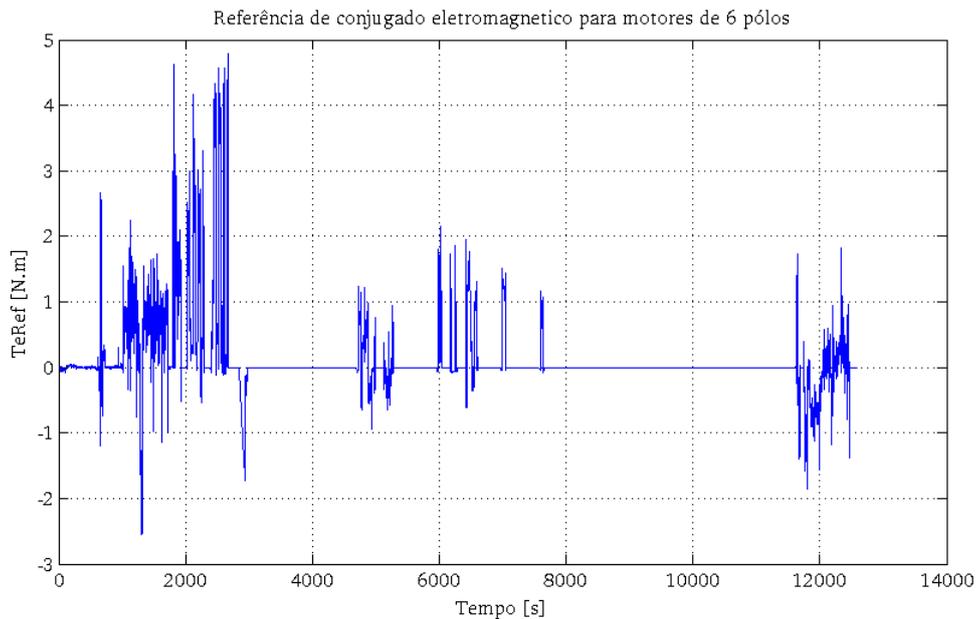


Figura 3.15: Referência de conjugado eletromagnético x tempo para a máxima demanda de conjugado medida na rotina dos catadores de papel e considerando a redutora aplicável à máquinas de 6 pólos.

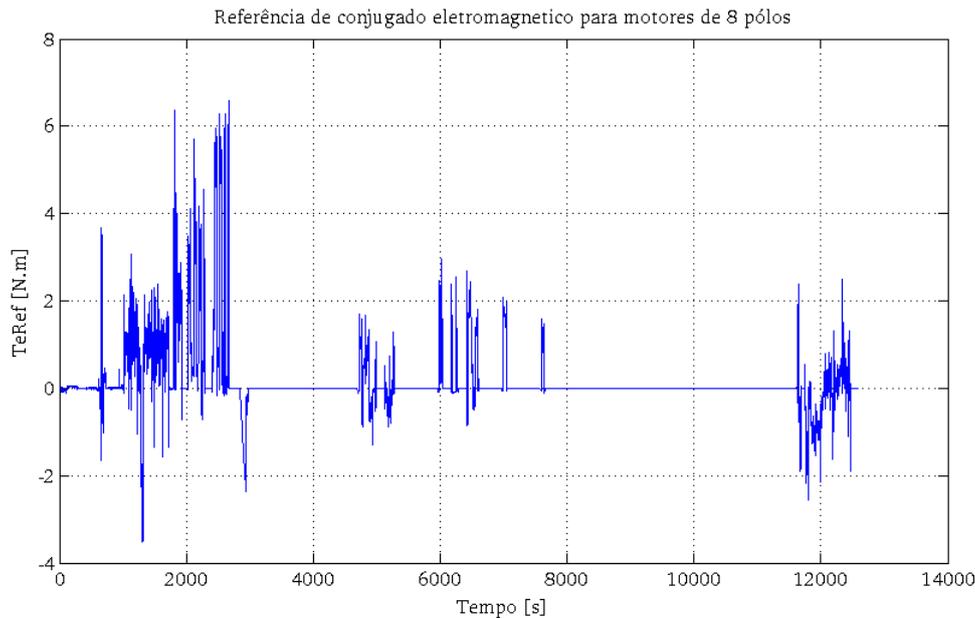


Figura 3.16: Referência de conjugado eletromagnético x tempo para a máxima demanda de conjugado medida na rotina dos catadores de papel e considerando a redutora aplicável à máquinas de 8 pólos.

3.2.5 Avaliação da região de linearidade entre corrente de estator e conjugado para cada um das máquinas candidatas ao acionamento do Vecarr

Ao se garantir que a máquina aplicada ao acionamento do Vecarr opere durante todo o tempo na região linear entre conjugado e corrente, garante-se que o material ferromagnético que a constitui não entre em saturação. Nessa condição, os parâmetros estimados pelo autoajuste do inversor para o circuito equivalente da máquina não se tornam significativamente diferentes dos parâmetros reais do circuito equivalente da máquina. Assim sendo, a operação em tal região de linearidade garante uma boa estimativa, por parte do inversor, da orientação espacial do sistema dq de referência utilizado pelo mesmo e, conseqüentemente, há garantia de desacoplamento das componentes ortogonais de corrente e do bom desempenho dinâmico do acionamento.

Para qualificar as máquinas candidatas quanto à região de linearidade entre corrente de estator e conjugado, será comparado o máximo conjugado demandado no pneu durante todos os dias de monitoramento da rotina dos catadores de papel com o máximo conjugado de cada máquina onde deixa de existir a linearidade. Foram então traçadas tais características para cada uma das máquinas apresentadas na Tabela 3.3 e as mesmas são apresentadas nas figuras 3.17 a 3.25. Tal como mostrado em tais figuras, a região de linearidade entre o conjugado eletromagnético e a corrente de estator, para todos os motores candidatos é maior que o conju-

gado máximo demandado em todos os dias monitorados. Portanto, todos motores candidatos atendem à premissa de operação em região linear. Como a carga demanda dos motores níveis de conjugado maiores que os nominais, pode ser que alguma máquina candidata queime por sobretemperatura. Esse fenômeno será analisado na próxima seção.

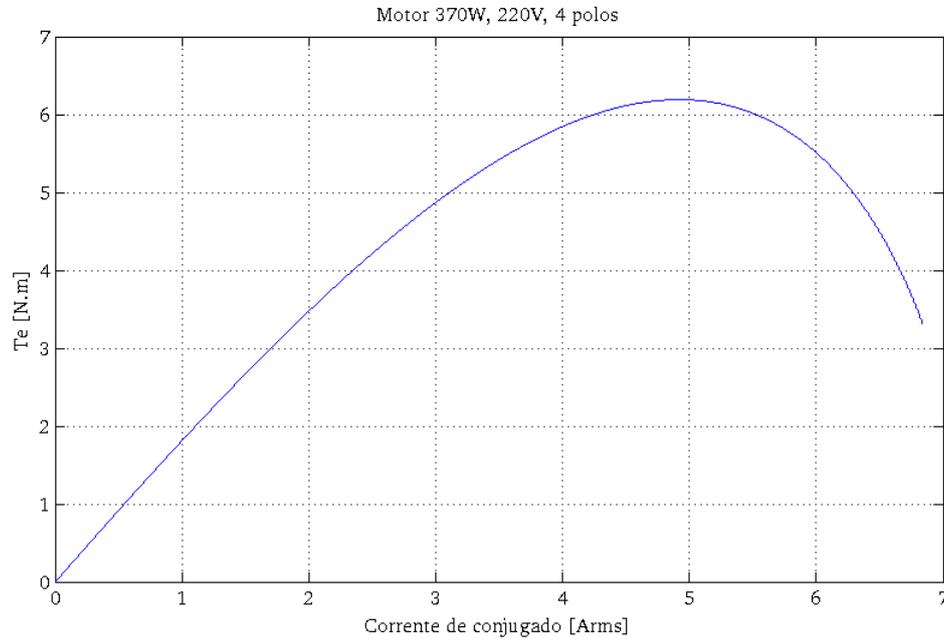


Figura 3.17: Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 370W, 220V, 4 pólos.

3.2.6 Avaliação da temperatura alcançada pelas máquinas candidatas ao acionamento do Vecarr durante as jornadas monitoradas

Mesmo embora os motores selecionados tenham capacidade de prover o conjugado demandado pela aplicação a qualquer instante e também sejam capazes de operar na região linear entre corrente e conjugado, algum(ns) dele(s) pode(m) queimar se o tempo de duração de alguma sobrecarga for muito extenso, ou se sucessivas situações de sobrecarga forem aplicadas ao motor sem intervalos adequados de resfriamento entre tais sobrecargas. Para motores de indução que operam a frequência constante, a taxa de vazão do ar de resfriamento é basicamente constante, pois tal vazão é proporcional à velocidade da máquina, e máquinas dessa natureza possuem uma região estável de operação contida em uma faixa restrita de escorregamento. Assim sendo, como a taxa de remoção de calor é constante, se a taxa de produção de calor for menor que o valor nominal suportado pelo motor, o mesmo não se queima. Como o maior mecanismo de produção de calor na máquina são as perdas no cobre do estator e rotor, e tais perdas são proporcionais ao quadrado da corrente de estator, há como se avaliar a taxa de

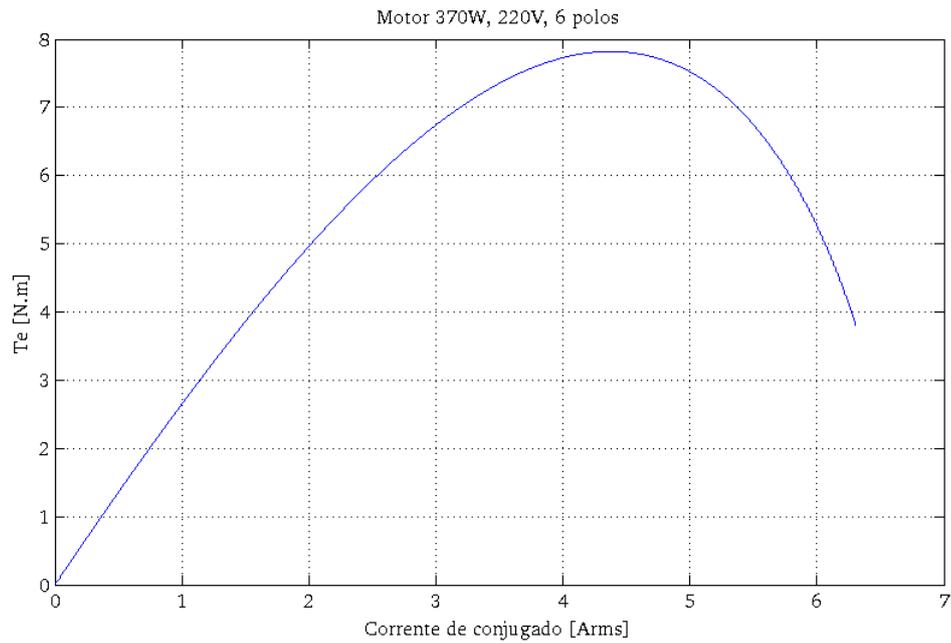


Figura 3.18: Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 370W, 220V, 6 pólos.

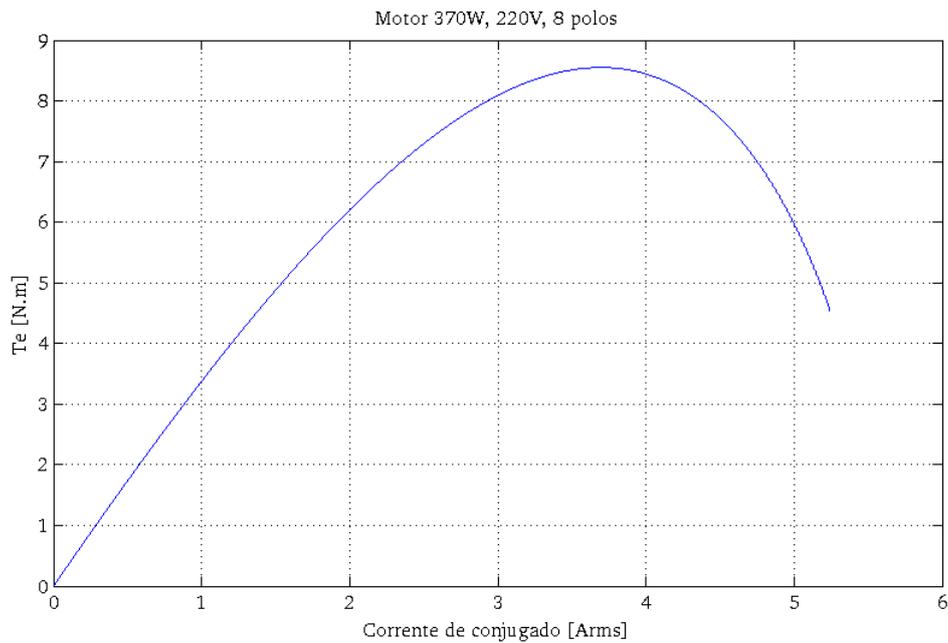


Figura 3.19: Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 370W, 220V, 8 pólos.

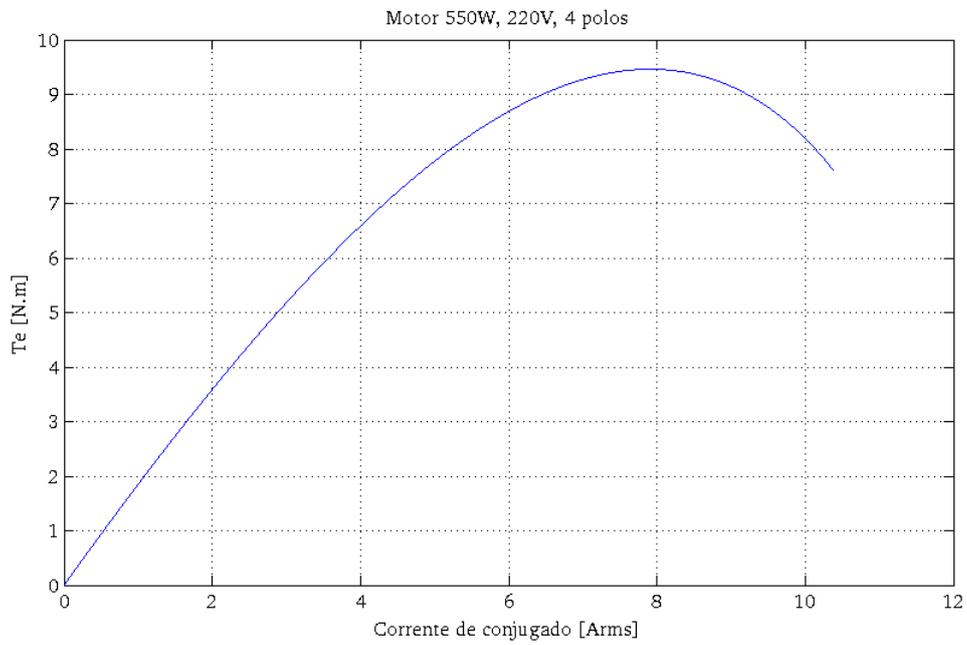


Figura 3.20: Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 550W, 220V, 4 pólos.

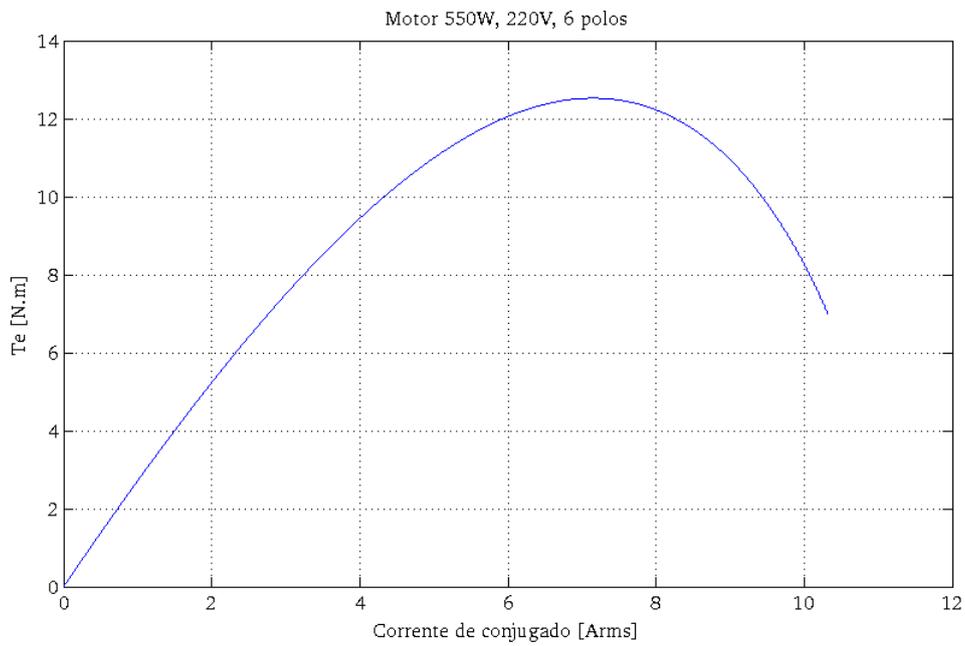


Figura 3.21: Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 550W, 220V, 6 pólos.

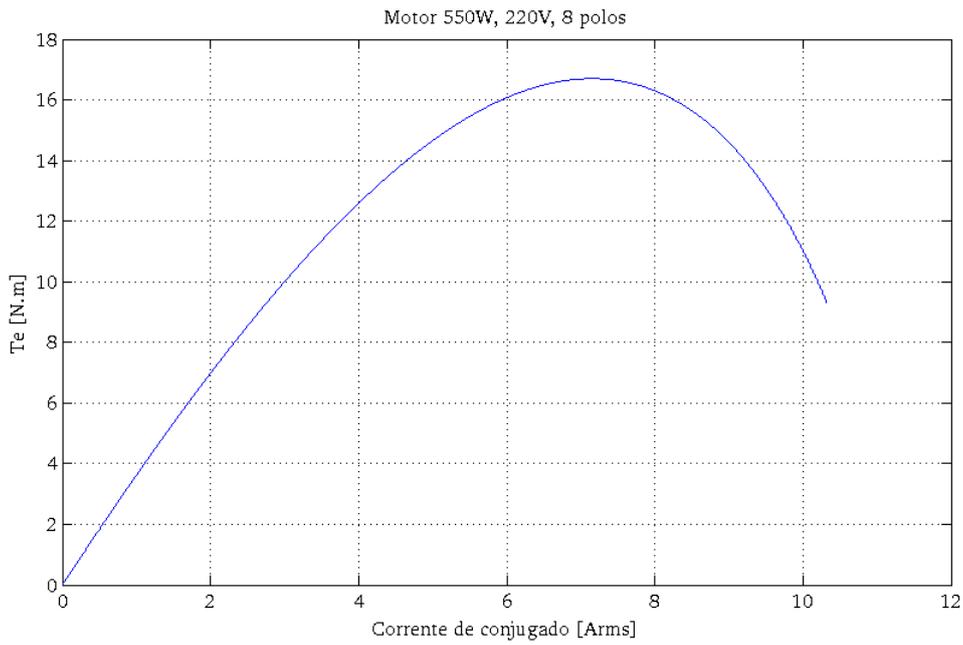


Figura 3.22: Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 550W, 220V, 8 pólos.

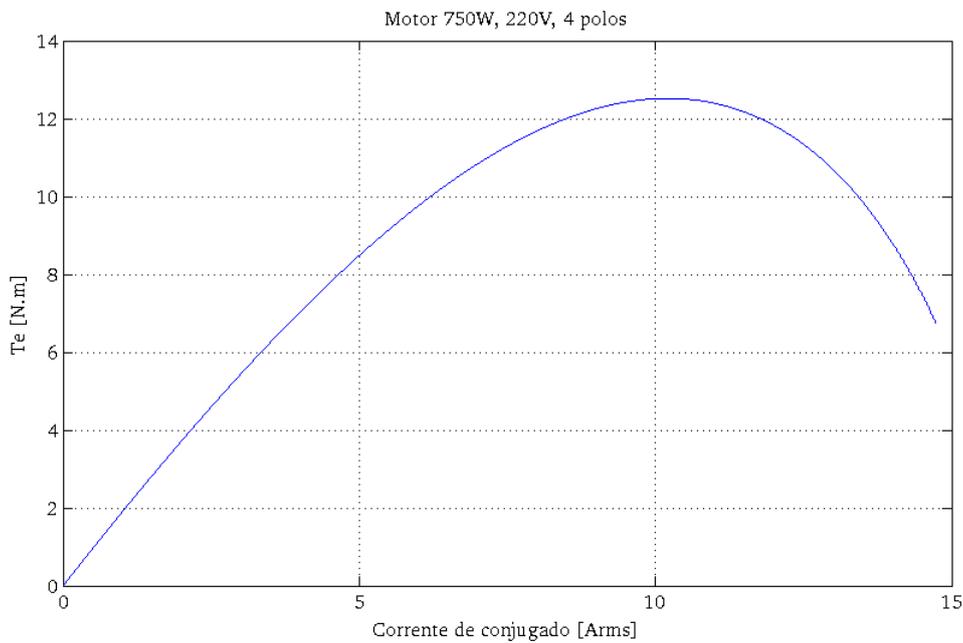


Figura 3.23: Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 750W, 220V, 4 pólos.

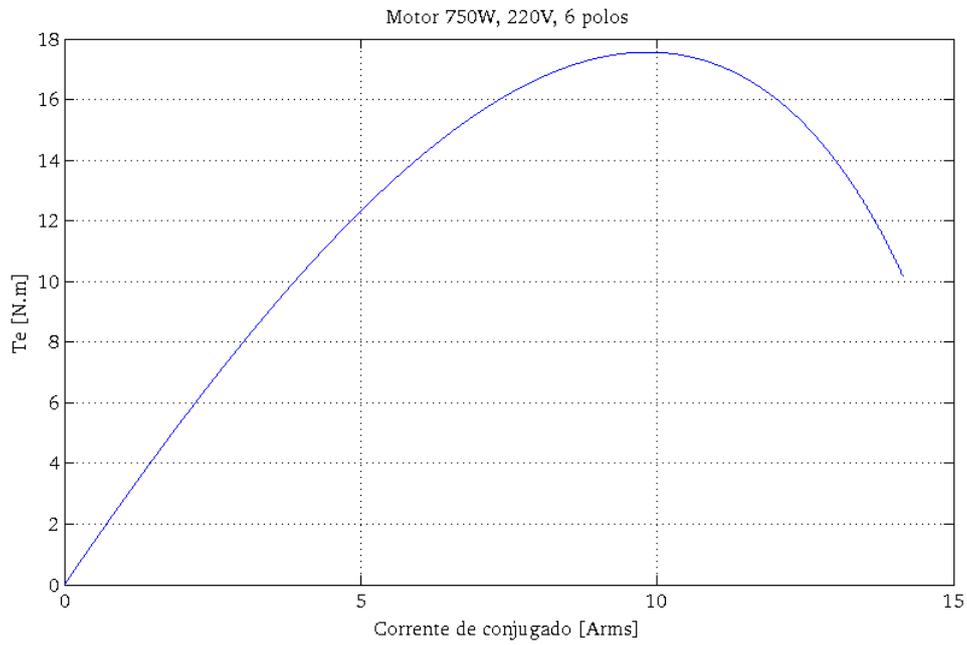


Figura 3.24: Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 750W, 220V, 6 pólos.

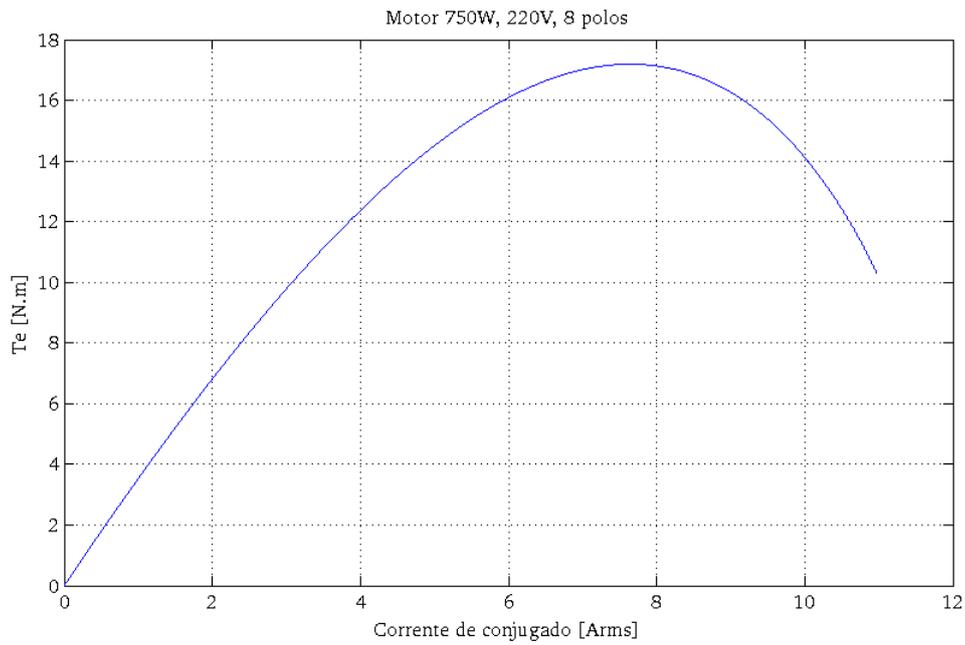


Figura 3.25: Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator para motor WEG alto rendimento 750W, 220V, 8 pólos.

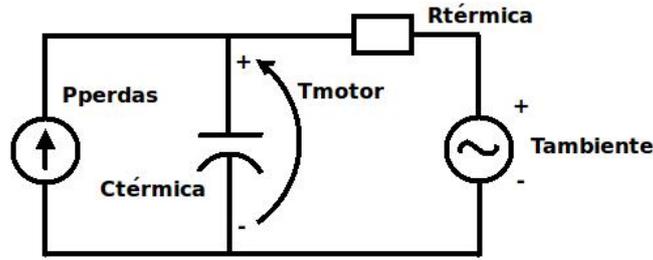


Figura 3.26: Circuito térmico equivalente para a máquina de indução.

produção de calor através da corrente térmica equivalente em um ciclo de trabalho da máquina. A formulação para o cálculo da corrente térmica equivalente é mostrada na equação 3.3.

$$i_{termica} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \cdot \int_0^{T_0} i_{srms}(t)^2 dt}. \quad (3.3)$$

A corrente térmica equivalente mostrada na equação 3.3 é interpretada como a corrente que, continuamente circulando nos terminais de estator da máquina, produza calor e portanto variações de temperatura na mesma taxa que a corrente eficaz variável no ciclo de trabalho real. Se a corrente térmica for maior que a corrente nominal, pode-se dizer que a máquina está operando em sobrecarga e, se tal sobrecarga for superior ao fator de serviço, a máquina irá queimar. No caso do Vecarr, porém, o cálculo da corrente térmica equivalente não permite prever se a máquina irá queimar pois a velocidade de operação é variável desde o valor nulo até o valor nominal e, portanto, a taxa de remoção de calor também será variável. Como a principal componente de carga do Vecarr é produzida pela gravidade, e tal componente é independente da velocidade do motor, serão observados valores idênticos para a corrente térmica tanto à baixa velocidade quanto à velocidade nominal. À baixa velocidade, com motor auto-ventilado, tal como proposto para o veículo, o calor produzido por um dado nível de corrente térmica será igual ao calor produzido à alta velocidade. No primeiro caso, porém, a taxa de remoção deste calor será menor que na operação à alta velocidade. Assim sendo, não é apropriado utilizar a corrente térmica equivalente para prever se alguma das máquinas candidatas irá queimar.

Para prever então a temperatura das máquinas em qualquer instante de operação, será utilizado o circuito térmico equivalente proposto Avolio [5]. Tal circuito é apresentado na Figura 3.26.

Tal como mostrado na Figura 3.26, o circuito térmico equivalente permite avaliar a temperatura no motor a partir da potência de perdas instantânea que o mesmo produz e da temperatura ambiente. Para parametrizar esse circuito térmico, demanda-se as caracterizações da resistência e capacitância térmicas do motor. A capacitância térmica traduz qual é a energia que deve

ser armazenada na máquina para que sua temperatura varie de 1 °C, ou seja, a capacitância térmica é igual à capacidade térmica da máquina. Portanto, o cálculo da capacitância térmica pode ser feito da forma apresentada na equação 3.4, ou seja, através do produto entre a massa de cada máquina, a qual é disponibilizada em catálogo, e o calor específico do ferro fundido, o qual é predominante na constituição da mesma.

$$C_{termica} = M_{motor} \cdot c_{especifico,Fe} \quad (3.4)$$

A resistência térmica mostrada na Figura 3.26 representa a variação de temperatura entre duas regiões do espaço para cada Watt de taxa de fluxo de calor entre essas regiões. Como esse parâmetro está relacionado à taxa de remoção de calor da máquina para o ambiente, o seu valor será função da velocidade de operação para máquinas auto-ventiladas. Além disso, a resistência térmica pode ser obtida subtraindo-se a temperatura máxima de trabalho da máquina pela temperatura ambiente, e dividindo-se esse resultado pela potência de perdas máxima admissível em um dado ponto de operação. Pela classe de isolamento da máquina, a qual determina a máxima temperatura de operação, e pelos valores nominais de placa, os quais determinam a potência de perdas nominais, é possível saber o valor da resistência térmica à velocidade nominal. Porém, para outros valores de velocidade de operação, tal como ocorre na operação do Vecarr, não há informações suficientes em catálogos de motores para calcular a resistência térmica. Essa impossibilidade ocorre porque não há a informação da máxima corrente que o motor suporta a uma dada velocidade sem que sua temperatura exceda o valor máximo determinado pela classe de isolamento. Tais variáveis de operação do motor - corrente máxima e velocidade - que permitiriam calcular a resistência térmica também são ausentes na literatura científica. Nesse cenário, buscou-se então informações de fabricantes, donde se encontrou as curvas de proteção implementadas por inversores de frequência. Tais curvas possuem o formato apresentado na Figura 3.27, tendo sido extraída do catálogo de inversores de frequência da família CFW09 da WEG [20].

O fabricante não apresenta os ensaios nos quais são obtidas as curvas de proteção tais como aquela apresentada na Figura 3.27, mas pelo grande volume de vendas do inversor de frequência que implementa tal curva e pelo alto grau de exigência quanto ao índice de disponibilidade para aplicações onde tais inversores são inseridos, será atribuída credibilidade técnica à curva de proteção e ela será utilizada para a determinação das resistências térmicas dos motores sob avaliação.

Para calcular a resistência térmica para um motor operando em um dado valor de velocidade

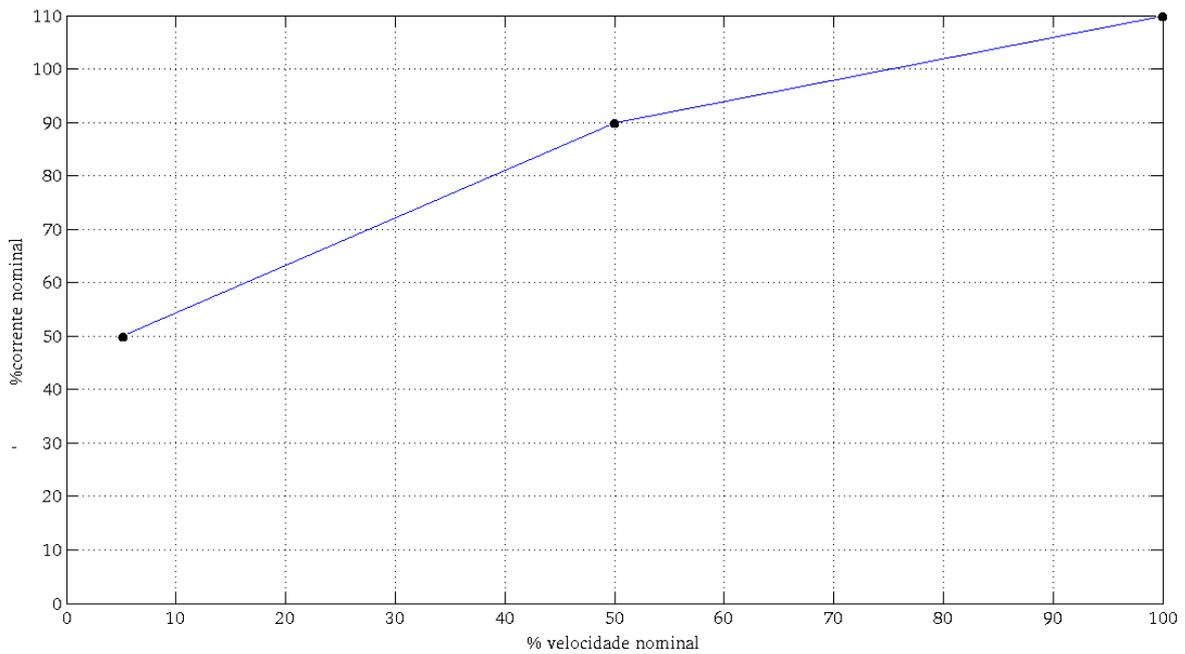


Figura 3.27: Níveis máximos de corrente de estator x velocidade de operação para motores de indução trifásicos, auto-ventilados e com rotor em gaiola. Copiada do manual do usuário - inversor WEG CFW09.

e corrente de estator máxima mostrados nos pontos da Figura 3.27, pode ser implementada a formulação mostrada na equação 3.5.

$$R_{termica}(i_{s,Max}, \omega_{mec}) = \frac{T_{max} - T_{ambiente}}{P_{perdas,max}(i_{s,Max}, \omega_{mec})} \quad (3.5)$$

Como mostrado na equação 3.5, a resistência térmica depende das temperaturas máxima e ambiente, as quais são parâmetros constantes e independentes do ponto de operação (para projetos a temperatura ambiente é tomada como sendo igual a 40°C), mas depende também da potência de perdas da máquina em cada ponto. Essa potência de perdas, por sua vez, depende dos estados físicos da máquina. Considerando o circuito equivalente do motor em regime permanente mostrado na Figura 3.7, a potência de perdas pode ser obtida, com boa aproximação, pela formulação mostrada na equação 3.6.

$$P_{perdas} = 3.(r_s.i_s^2 + r_r.i_r^2 + r_{fe}.i_{fe}^2) \quad (3.6)$$

Destaca-se que na equação 3.6 não estão contempladas as perdas por atrito e ventilação, as quais não são as perdas mais representativas da máquina quando a mesma possui lubrificação adequada de mancais. Além disso a equação 3.6 mostra que há infinitos valores possíveis para a potência de perdas, porém, para a utilização no circuito térmico, somente interessa a potência de perdas máxima, ou seja, a potência de perdas que leva a máquina a operar com máxima

temperatura permissível pela classe de isolamento. Também como mostrado na equação 3.6 essa máxima potência de perdas ocorre quando há máxima corrente de estator. Tal argumento é válido pois a corrente de Foucault no ferro da carcaça é muito menor que a corrente estator, uma vez que a resistência equivalente de perdas no ferro é muito grande pela laminação do ferro no núcleo magnético. Além disso, a corrente de rotor i_r se difere da corrente de estator i_s pela corrente de magnetização i_m e, em inversores que operam com controle vetorial, tal qual ocorrerá com o Vecarr, a corrente de magnetização é regulada para ser constante. Assim sendo, quanto maior for a corrente de estator, maior será a de rotor também, e conseqüentemente maiores serão as perdas. Para obter então a máxima potência de perdas que pode ser gerada pela máquina, será utilizada a máxima corrente de estator sugerida pelo fabricante de inversores mostrada na Figura 3.27.

A curva de máxima corrente de estator 3.27 apresenta em qual velocidade tais correntes podem circular na máquina. Para obter a potência de perdas, é necessário impôr tais valores ao circuito equivalente em regime permanente mostrado na Figura 3.7. Porém, nesse circuito, também é necessário se impor o escorregamento, e há infinitos valores de escorregamento e tensão de estator que podem ser impostos e que resultarão nas mesmas corrente máxima e velocidade propostos na curva de proteção do inversor. Assim sendo, para escolher o valor correto de escorregamento, será utilizada uma premissa de controle dos próprios inversores que aplicam a curva de proteção. Tais inversores controlam o motor regulando as correntes de magnetização e conjugado. A corrente de magnetização é mantida constante e igual à corrente à vazio da máquina, a qual é levantada pelo próprio inversor em sua rotina de auto-ajuste. Tais correntes de magnetização podem ser levantadas impondo-se tensão nominal, frequência nominal e escorregamento muito menor que o nominal ao motor, tal como em um ensaio de circuito aberto. Aplicando tal procedimento aos 9 motores candidatos, obtêm-se as correntes de magnetização apresentadas na Tabela 3.4.

Para cada um dos 9 motores candidatos, foi feito o cálculo da potência de perdas nos 3 pontos destacados na curva de proteção do inversor. Para cada um desses 3 pontos, foi mantida constante a respectiva corrente de magnetização do motor em questão, tal como procede-se o controle vetorial do inversor, e foi então variado o escorregamento “s” da máquina em toda a faixa de operação motora ($0 < s < 1$), até se encontrar a corrente de estator em um dado escorregamento que fosse igual à corrente máxima de estator mostrada na curva de proteção do inversor. O procedimento de cálculo tomando como referência o circuito equivalente da Figura 3.7 é mostrado nos passos descritos nas equações 3.7 a 3.14.

Tabela 3.4: Corrente de magnetização dos motores candidatos ao acionamento do Vecarr para operação na região de conjugado constante. Todos os motores listados são da família WEG alto rendimento, com alimentação nominal em 220V, 60Hz.

Especificação do Motor	corrente de magnetização [A_{rms}]
370W, 4 pólos	1,49
370W, 6 pólos	1,52
370W, 8 pólos	1,77
550W, 4 pólos	1,95
550W, 6 pólos	2,11
550W, 8 pólos	2,31
750W, 4 pólos	1,66
750W, 6 pólos	2,29
750W, 8 pólos	3,14

$$i_M = i_{s,vazio} \quad (3.7)$$

$$\omega_e = \frac{\omega_r}{(1-s)} = \frac{P}{2} \cdot \frac{\omega_{mec}}{(1-s)} \quad (3.8)$$

$$v_M = j \cdot \frac{\omega_r}{(1-s)} \cdot M \cdot i_M \quad (3.9)$$

$$i_r = \frac{v_M}{j \cdot \frac{\omega_r}{(1-s)} \cdot Llr + \frac{r_R}{s}} \quad (3.10)$$

$$i_x = i_M + i_r(s) \quad (3.11)$$

$$v_{Fe} = v_M + j \cdot Xls \cdot i_x(s) \quad (3.12)$$

$$i_{Fe} = \frac{v_{Fe}}{r_{Fe}} \quad (3.13)$$

$$i_{Fe} + i_x = i_s \Rightarrow i_{s,Max} - i_{Fe}(s_{operacao}) - i_x(s_{operacao}) = 0 \quad (3.14)$$

Com os valores da corrente de estator máxima da curva de proteção " $i_{s,Max}$ ", com o escorregamento de operação naquela corrente máxima e com a corrente de magnetização nominal da máquina, obtém-se as correntes de rotor e de perdas no ferro, bem como a potência de perdas

Tabela 3.5: Resistências térmicas para os 3 pontos parametrizáveis na curva de proteção do inversor de frequência e contemplando todos os motores candidatos à tração do Vecarr.

Máquina	$R_{termica}(\omega = 5\%\omega_{nom})$ [°C/W]	$R_{termica}(\omega = 50\%\omega_{nom})$ [°C/W]	$R_{termica}(\omega = 100\%\omega_{nom})$ [°C/W]
370W, 4 pólos	2,38	1,49	0,53
370W, 6 pólos	1,29	0,89	0,38
370W, 8 pólos	1,14	0,78	0,35
550W, 4 pólos	1,81	0,80	0,38
550W, 6 pólos	1,27	0,67	0,34
550W, 8 pólos	0,85	0,43	0,23
750W, 4 pólos	1,84	0,96	0,46
750W, 6 pólos	1,41	0,72	0,37
750W, 8 pólos	0,70	0,36	0,20

da máquina naquele ponto de operação, tal como apresentado na equação 3.6.

Assim sendo, para cada máquina candidata à operação do Vecarr – motores WEG 220V de 370, 550 e 750W com 4, 6 e 8 pólos – foram levantadas as potências de perdas para os pontos mostrados na Figura 3.27. Aplicando-se ao circuito térmico equivalente mostrado na Figura 3.26 as potências de perdas obtidas para cada ponto de operação dado na curva da Figura 3.27 obtém-se, para todos os motores candidatos, as resistências térmicas equivalentes a cada velocidade. Tais valores são mostrados na Tabela 3.5.

Com os valores das resistências térmicas das máquinas candidatas, as temperaturas das mesmas podem ser obtidas durante os instantes de operação monitorados em campo. Para isso será utilizada uma plataforma de simulação computacional baseada em um acionamento com controle vetorial dos motores candidatos e que garanta no eixo do veículo simulado o mesmo conjugado real desenvolvido pelos catadores de papel em sua rotina de trabalho.

Como a rotina real dos catadores possui ciclos de trabalho de até 14400 segundos e as dinâmicas eletromagnéticas típicas para motores de pequeno porte são da ordem de milisegundos, as simulações seriam muito lentas se executadas em plataforma Matlab. Para contornar esse obstáculo, foi desenvolvida uma biblioteca em C++ sob o paradigma da orientação a objetos e contendo classes representativas dos elementos típicos de um acionamento com controle vetorial. Assim sendo, foram desenvolvidas classes para conversões abc/dq e dq/abc, integrador de 2^a ordem, regulador PI, gerador de PWM e máquina de indução.

O diagrama de blocos do sistema de simulação, o qual também ilustra a interface entre as classes, é apresentado na Figura 3.28.

A estrutura de simulação mostrada na Figura 3.28 foi projetada para se garantir que as mesmas variáveis de trajetória mecânica impostas ao veículo dos catadores na rotina real de

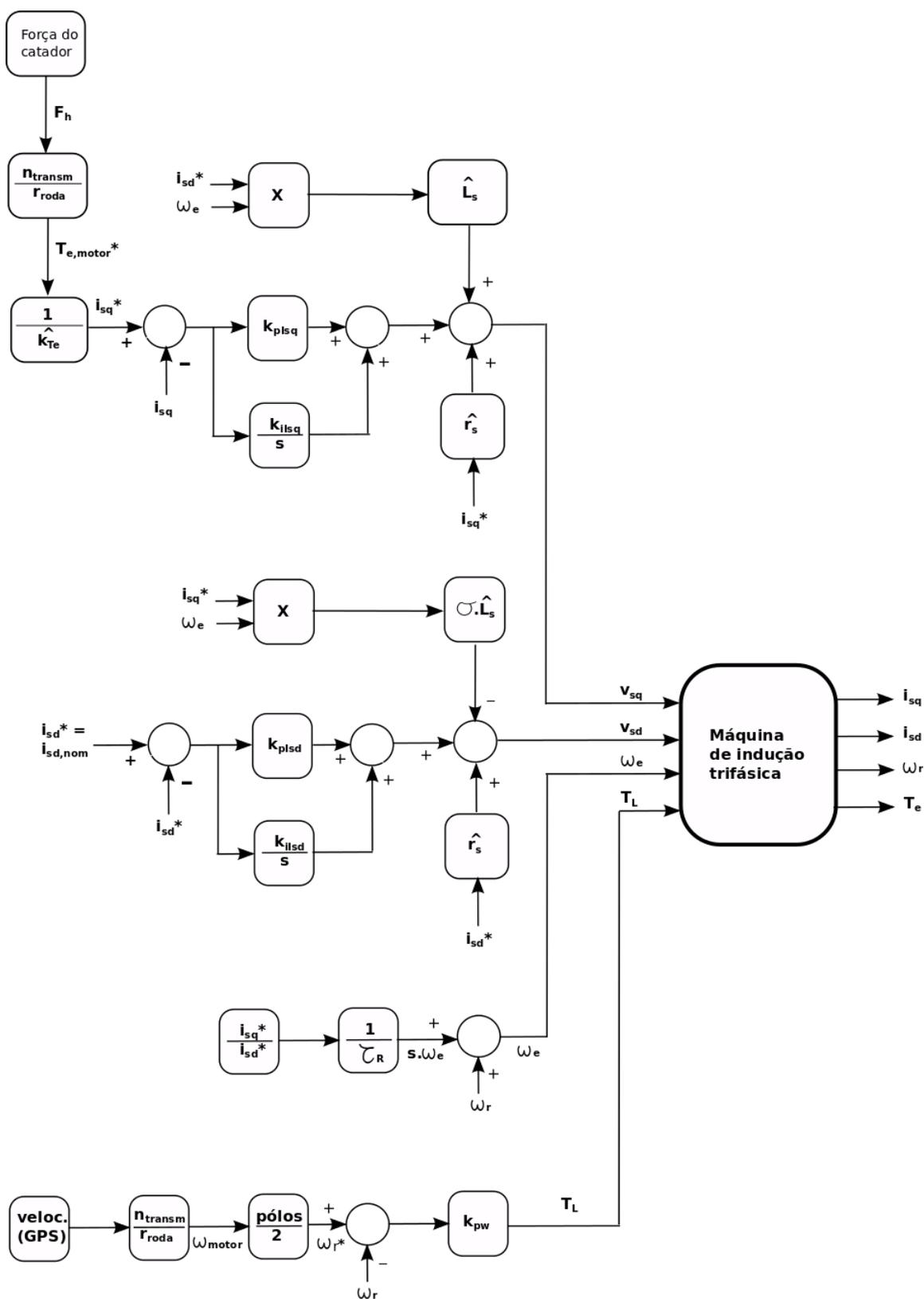


Figura 3.28: Diagrama de blocos para simulação das máquinas elétricas candidatas à tração do Vecarr, considerando as demandas de força e velocidade reais medidas na rotina de trabalho dos catadores de papel.

trabalho fosse reproduzida pelo acionamento elétrico candidato. Para isso, a simulação deve também garantir que o conjugado desenvolvido pelo catador ao eixo da roda seja igual ao conjugado eletromagnético desenvolvido no eixo da roda durante a simulação. Além disso, o mesmo conjugado de carga real aplicado ao eixo da roda deve ser reproduzido na simulação.

O conjugado imposto pelos catadores ao eixo da roda é igual à força aplicada pelos mesmos multiplicada pelo raio da roda. Essa força foi medida pela célula de carga, digitalizada e armazenada. Assim sendo, uma das malhas de controle da simulação mostrada na Figura 3.28 é uma malha de controle de conjugado que recebe como referência a força real imposta pelos catadores.

O conjugado de carga presente na roda durante o monitoramento dos catadores é composto por 3 componentes - gravitacional, de rolamento e aerodinâmica. O conjugado aerodinâmico é desprezível nessa aplicação pela baixa velocidade de deslocamento do veículo. O conjugado gravitacional depende da massa e da inclinação do piso onde se desloca o veículo. O conjugado de atrito nos rolamentos depende do coeficiente de atrito dos mesmos e da massa embarcada. Como o levantamento do coeficiente de atrito de rolamento do veículo depende de ensaios específicos, os quais são complexos de se realizar pela estrutura laboratorial disponível, e o conjugado gravitacional depende de medições de inclinação e massa, foi projetada para simulação uma segunda malha de controle que atua sobre o conjugado de carga total visando garantir que a velocidade instantânea do acionamento simulado seja igual àquela medida no acionamento real. Garantindo tal condição em regime dinâmico, a aceleração angular da simulação também será igual ao valor real medido em campo. Com os valores instantâneos da aceleração angular e com o momento de inércia da roda, é possível garantir que o conjugado de aceleração da simulação seja igual àquele apreciado em campo. Se uma malha garante a imposição de conjugado eletromagnético e a outra malha garante a imposição do conjugado de aceleração, com certeza o conjugado de carga imposto na simulação é igual àquele presente em campo. Essa argumentação garante que o sistema de simulação apresentado na Figura 3.28 é representativo da medição em campo e, portanto, as conclusões extraídas do mesmo possuem credibilidade.

A terceira malha de controle mostrada na Figura 3.28 é destinada à regulação da corrente de magnetização da máquina de indução. Como essa variável possui dinâmica lenta e ela interfere no valor do conjugado eletromagnético, o seu valor de referência é mantido constante enquanto variações na força de referência impostas pelo catador são traduzidas como variações na referência de i_{sq} . Essa abordagem garante maior faixa de passagem para a malha que

Tabela 3.6: Sintonia dos compensadores utilizados para simular o desempenho de acionamentos elétricos para realizar as mesmas rotinas de trabalho dos catadores .

Parâmetro	Ajuste
k_{pIsq}	100 [V/A]
k_{iIsq}	3000 [V/C]
k_{pIsd}	10 [V/A]
k_{iIsd}	3000 [V/C]
k_{pw}	100 [N.m/(rad/s)]

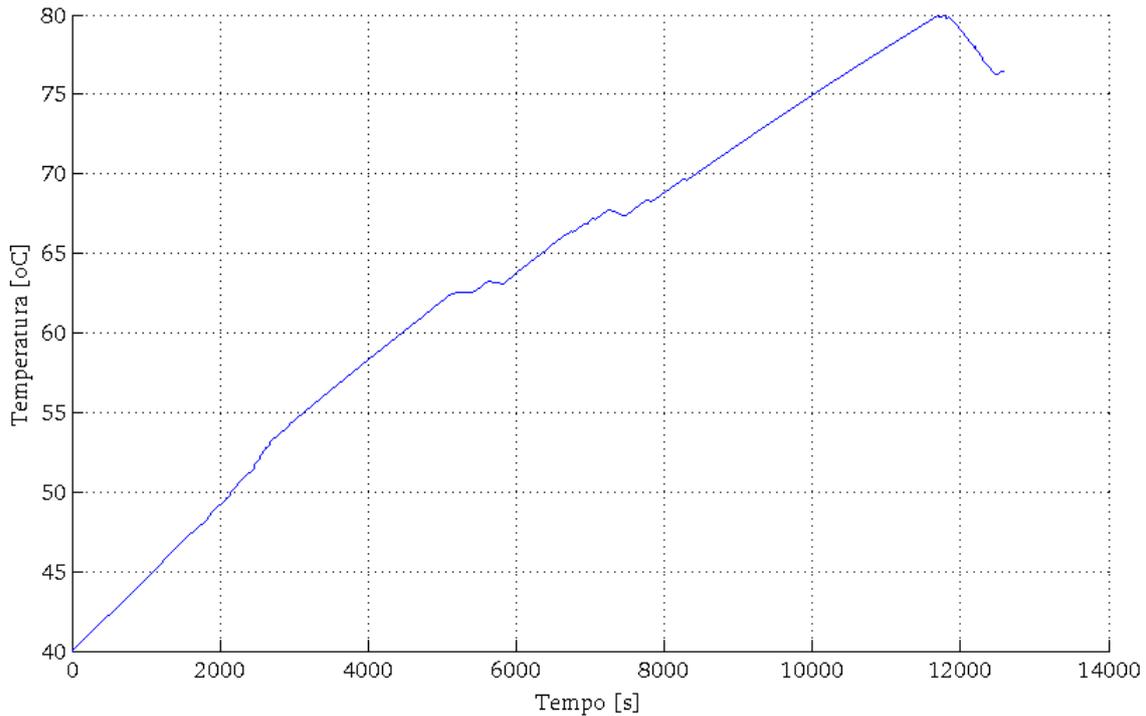


Figura 3.29: Curva da máxima temperatura observada dentre todos os motores candidatos.

reproduz na simulação o conjugado de acionamento real imposto em campo [56].

Para garantir desempenho dinâmico adequado ao sistema, de tal forma que a força da catador e a aceleração angular da simulação sejam iguais àquelas medidas em campo, foram sintonizados os ganhos para os compensadores do sistema de simulação mostrados na Tabela 3.2.6.

Com todo o sistema de simulação para o acionamento elétrico configurado, bem como tendo os respectivos circuitos térmicos equivalentes dos motores modelados, foram feitas 81 simulações computacionais, as quais contemplam o desempenho de 9 motores – 370, 550 e 750W com 4, 6 e 8 pólos – aplicados para tracionar 9 rotinas de trabalho monitoradas nas ruas.

Um dos resultados dessas simulações é a temperatura de cada motor em cada instante de tempo monitorado. Das 81 curvas de temperatura instantânea obtidas, aquela onde o motor apresentou o maior valor para tal grandeza é apresentada na Figura 3.29.

Como mostrado na Figura 3.29, a máxima temperatura alcançada foi de 64,8°C. Para motores classe de isolamento B, os quais suportam uma elevação de temperatura de 80 °C a partir de uma temperatura ambiente de 40°C, garante-se que nenhum dos motores candidatos irá se queimar. Destaca-se também que a baixa elevação de temperatura observada ocorre pelo longo período que os catadores mantém seus veículos parados para a deposição de carga e, nesses intervalos, a máquina elétrica se resfriaria. Para garantir o pior cenário de aumento de temperatura observado nas simulações, foi comandada magnetização ininterrupta dos motores mesmo durante os períodos onde os catadores pararam o veículo. Na aplicação real, a corrente de magnetização poderia ser desabilitada após um dado intervalo de tempo onde o veículo se encontra parado. Tal abordagem garantiria uma temperatura de operação menor ao motor.

Para concluir a seleção dos 9 motores, foi avaliada a energia total consumida por cada um deles operando em todas as 9 rotinas de trabalho monitoradas. Para tal cálculo, foram utilizadas nas 81 simulações a formulação apresentada na equação 3.15.

$$E(t) = \int_0^t (v_{sq}(t) \cdot i_{sq}(t) + v_{sd}(t) \cdot i_{sd}(t)) dt \quad (3.15)$$

A soma das energias consumidas por cada motor aplicado a todos os ciclos de trabalho monitorados é apresentada na Figura 3.30.

Pelos gráficos apresentados na Figura 3.30, observa-se que os motores mais eficientes para a tarefa avaliada são os de 370W e 750W, ambos com 4 pólos. A energia consumida pelo motor de 370W é de 0,971MJ, enquanto o valor consumido pelo motor de 750W foi também igual a 0,969MJ. Como esses valores são praticamente idênticos e o motor de 370W possui menor custo, ele será especificado para tracionar o Vecarr.

3.3 Especificação do banco de baterias

Existem diversas tecnologias de baterias e a escolha de uma delas depende das características da aplicação específica onde as mesmas serão empregadas. Para aplicações de veículos elétricos, é importante que o veículo tenha a máxima autonomia possível, o que é favorecido pela redução na massa embarcada ao mesmo. Para favorecer essa redução de massa, as baterias embarcadas devem possuir a máxima relação kWh/kg. Das tecnologias consolidadas atualmente, as baterias chumbo-ácido, NiMH e Litium-Ion possuem densidades de energia respectivamente iguais a 35, 55 e 90Wh/kg [15]. Apesar das baterias de NiMH e Li-Ion possuírem maiores densidades de energia, elas possuem limitações mais severas quanto à faixa de temperatura permssível para

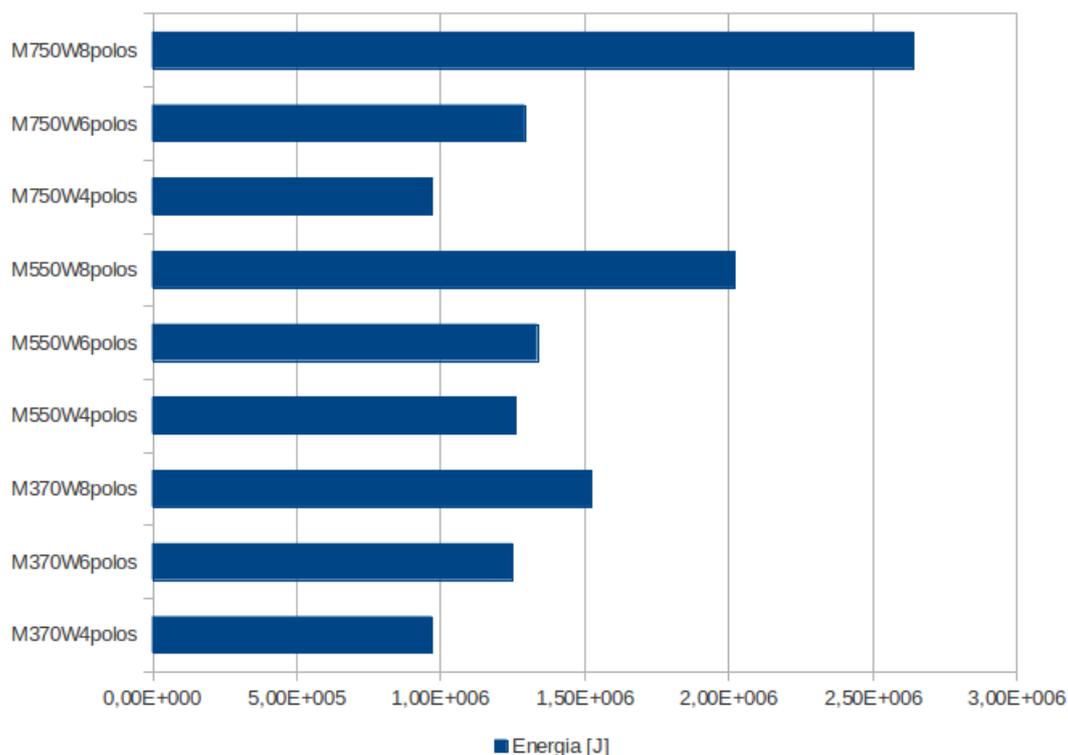


Figura 3.30: Soma da energia total consumida por cada motor candidato nas 9 rotinas de trabalho monitoradas nas ruas de São João del Rei.

trabalho. A bateria NiMH só pode operar na faixa de -20 a 50°C , enquanto a bateria Li-ion opera na faixa de 0 a 40°C . Para garantir operação nessas faixas, tais baterias demandam a aquisição de acessórios, o que faz com que seus respectivos custos sejam aproximadamente 7 vezes maiores que aquele apreciado para um banco de bateria chumbo-ácido com mesma capacidade de energia [15]. Esse alto custo de aquisição inibe o uso de baterias NiMH ou Li-Ion em aplicações onde sejam severas as restrições orçamentárias.

Assim sendo, será apresentada nessa seção a especificação do banco de baterias utilizando células com a tecnologia chumbo-ácido. Apesar dessas baterias não admitirem ciclos profundos de descarga, pois seu tempo de vida útil cai abruptamente, as mesmas poderiam ser aplicadas ao Vecarr desde que o usuário retornasse ao ponto de recarga quando o nível de carga caísse ao valor mínimo especificado pelos fabricantes, o qual se situa em torno de 80% da carga máxima. Além disso, como a aplicação do Vecarr demanda um acionamento com potência típica de $0,5\text{cv}/220\text{V}$, é necessário um barramento CC de 311V para se sintetizar 1,0 pu de tensão nos terminais de estator considerando a sobreposição de um sinal de 3^o harmônico ao sinal modulante fundamental em um modulador SVPWM [35]. Tal barramento pode ser sintetizado com 26 baterias de 12V ligadas em série. Há disponível no mercado nacional baterias chumbo-ácido reguladas à válvula com massas típicas de 1,8kg e 12V, as quais poderiam compor o

barramento com 46,8kg de massa embarcada. Como o cenário utilizado para exemplificar as metodologias apresentadas nessa tese contempla uma massa nominal embarcada de 500kg, a massa de 46,8kg do banco de baterias chumbo-ácido representaria aproximadamente 10% da carga útil e, portanto, o seu embarque não reduziria demasiadamente tal capacidade. Como exemplo de embasamento à tal análise, os exoesqueletos apresentados no capítulo 2 transportam massas úteis da ordem de 1,0pu com um exoesqueleto de massa igual a 0,5pu. Vários veículos de passeio possuem a mesma relação entre a massa de sua estrutura e a massa útil transportada.

A especificação de um banco de baterias resulta na capacidade de carga que o mesmo deve possuir e, tipicamente, tal capacidade é medida em [A.h]. Para baterias comerciais, a especificação de suas respectivas cargas nominais em [A.h] corresponde à circulação contínua de corrente por seus terminais durante um intervalo de 20 horas. Assim sendo, uma bateria com capacidade nominal de 5[A.h] consegue alimentar uma carga de 0,25[A] durante 20 horas. Se a carga demandar corrente variável das baterias, tal como ocorre com o Vecarr, o tempo necessário para consumir a sua carga nominal não varia de forma linear com a corrente e, nesse tipo de situação, não há nos catálogos de fabricantes ou na literatura científica métodos para especificação de baterias chumbo-ácido. Essa oportunidade de exploração será avaliada nos próximos parágrafos. Para isso, serão revisados os modelos e circuitos elétricos equivalentes explorados em teses de doutorado e artigos. O comportamento de tais circuitos será analisado para a condição típica da corrente de carga imposta pelo Vecarr. Após tal análise, serão correlacionados os dados disponíveis em catálogos de fabricantes com os elementos do circuito equivalente da bateria. Ao se estabelecer tal correlação, será obtido um modelo simplificado para a bateria o qual se baseará em dados de catálogos. Nesse ponto, serão simulados os comportamentos de diversos modelos de um fabricante específico para caracterizar qual deles é capaz de acionar o Vecarr nos trajetos monitorados, e será então eleita a bateria que apresentar o menor nível de descarga.

Tal como mostrado por Wiegman [84], o modelo de baterias chumbo-ácido contempla associações RC paralelas que modelam as propriedades dinâmica e dissipativa de diferentes elementos químicos da bateria. Nesse modelo, as impedâncias elétricas são associadas aos seguintes fenômenos:

- transferência de cargas na interface eletrodo-eletrólito ou potencial de ativação: há calor produzido na interfase eletrodo-eletrólito, bem como no contato elétrico da bateria com sua carga. Esse fenômeno é modelado por uma resistência;
- formação de camada dupla na região eletrodo-eletrólito: na interface entre eletrodo e

eletrólito, cargas de sinais opostos se acumulam sem recombinação, caracterizando efeito capacitivo;

- difusão de cargas: devido à história de circulação de corrente na bateria e à anomalias na concentração de eletrólitos na solução, ocorre difusão de eletrólitos para a interface entre solvente e eletrodo durante a circulação de corrente pela bateria. Esse fenômeno causa aquecimento, a qual é modelada por uma resistência elétrica, bem como possui dinâmica e caracteriza centros de cargas elétricas de sinais distintos na solução, o que é modelado por um capacitor elétrico.
- transporte de massa: para valores elevados de corrente ou alta concentração de carga, não ocorre somente o deslocamento de cargas do eletrólito para o eletrodo, mas também se verifica o transporte de reagentes físicos. Esse fenômeno só ocorre nas situações extremas mencionadas, possui dinâmica lenta e também é modelado por uma associação RC.
- gaseificação: esse fenômeno ocorre primordialmente em células aquosas, onde a água líquida é decomposta em $1/2\text{O}_2$ e H_2 , tornando-se gás. A gaseificação ocorre naturalmente, sendo responsável pela auto descarga da bateria, e seu efeito é intensificado quando há corrente de carregamento elevada em uma bateria que já possui alto nível de carga. Tal fenômeno deve ser evitado para rejeitar problemas térmicos e perda de água na bateria. Como veículos elétricos possuem frenagem regenerativa, seguramente haverá situações que irão impôr alta corrente de carregamento à bateria quando a mesma já está carregada. Assim sendo, há a necessidade de resistores de frenagem ou super capacitores ligados em paralelo às baterias para evitar a gaseificação do solvente.

Os fenômenos listados podem ser eletricamente representados pelo circuito equivalente apresentado por [84] e reproduzido na Figura 3.31.

O circuito apresentado na Figura 3.31 é não linear pois os resistores e capacitores variam em função da temperatura, do sentido da corrente, da amplitude da corrente e do nível de carga da bateria. Diversos trabalhos propõem metodologias para encontrar os parâmetros desse circuito equivalente. Uma das metodologias apresentadas é a espectroscopia, tal como apresentado por Wiegman [84] e Büller [15]. Nesse método, correntes de frequência não nula e de baixa amplitude são sobrepostas a níveis de corrente contínua e aplicadas à bateria. Esse processo resulta em componentes harmônicas de tensão nos terminais da bateria e as mesmas são medidas. Com as medições de tensão e a imposição de corrente, a impedância de pequenos sinais no ponto de operação específico é caracterizada. Após tal caracterização, a simulação de

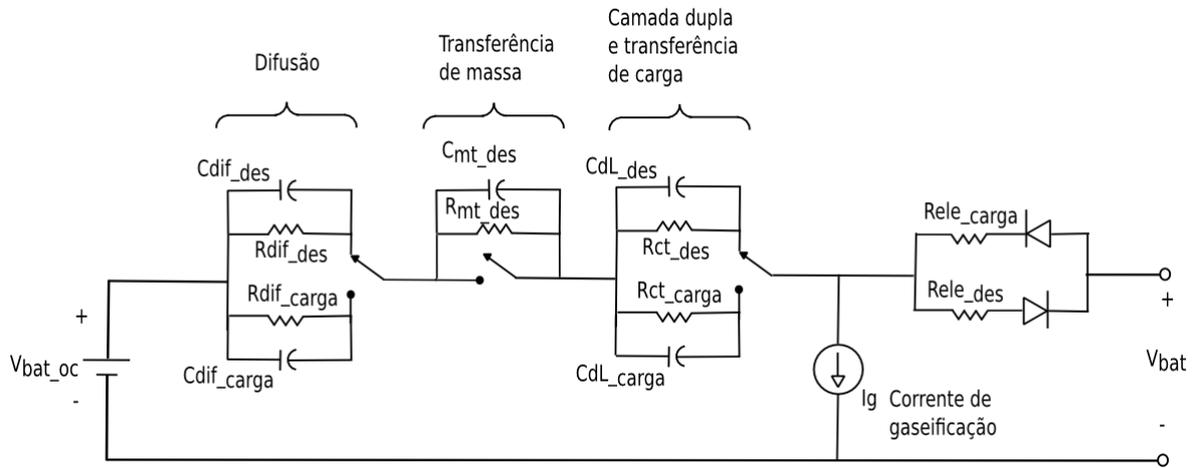


Figura 3.31: Circuito elétrico equivalente da bateria. Todos os parâmetros passivos são não lineares.

eventos de grandes sinais é feita calculando-se a tensão da bateria pela integral de pequenas variações de tensão em regimes permanentes sucessivos. Tais pequenas variações são dadas pelo produto entre a impedância extraída da espectroscopia pela corrente de carga imposta, e apresentadas nas equações 3.16 e 3.17.

$$\Delta V_{bat} = Z(I_{bat}) \cdot \Delta I_{bat} \tag{3.16}$$

$$V_{bat} = \int_0^t \Delta V_{bat} \tag{3.17}$$

Conforme mostrado por Wiegman [84] e Buller [15], a implementação do método de espectroscopia resulta em impedâncias equivalentes de pequenos sinais que variam com o nível de carga, com o sentido da corrente, com o nível de corrente DC sobreposta, com a temperatura e com o estado de carga da bateria. Mediante a variação desses parâmetros, apresenta-se nas figuras 3.32 a 3.37 os diagramas de Nyquist com as partes real e imaginária das impedâncias típicas obtidas para operação de pequenos sinais de uma bateria chumbo-ácido.

Os diagramas de impedância de pequenos sinais de baterias com o formato mostrado na Figura 3.32 podem ser obtidos com infinitas associações RC paralelas ligadas em série. Tal abordagem inviabiliza a parametrização do circuito equivalente mostrado na Figura 3.31 e, portanto, os pesquisadores geralmente simplificam o circuito equivalente a essa associação por duas associações paralelas RC onde as resistências também variam com a frequência, tal como mostrado na Figura 3.38. Além disso, observa-se o desenho de dois arcos de círculo na Figura, motivo pelo qual os pesquisadores da área de baterias denominam tal característica como impedância em arco.

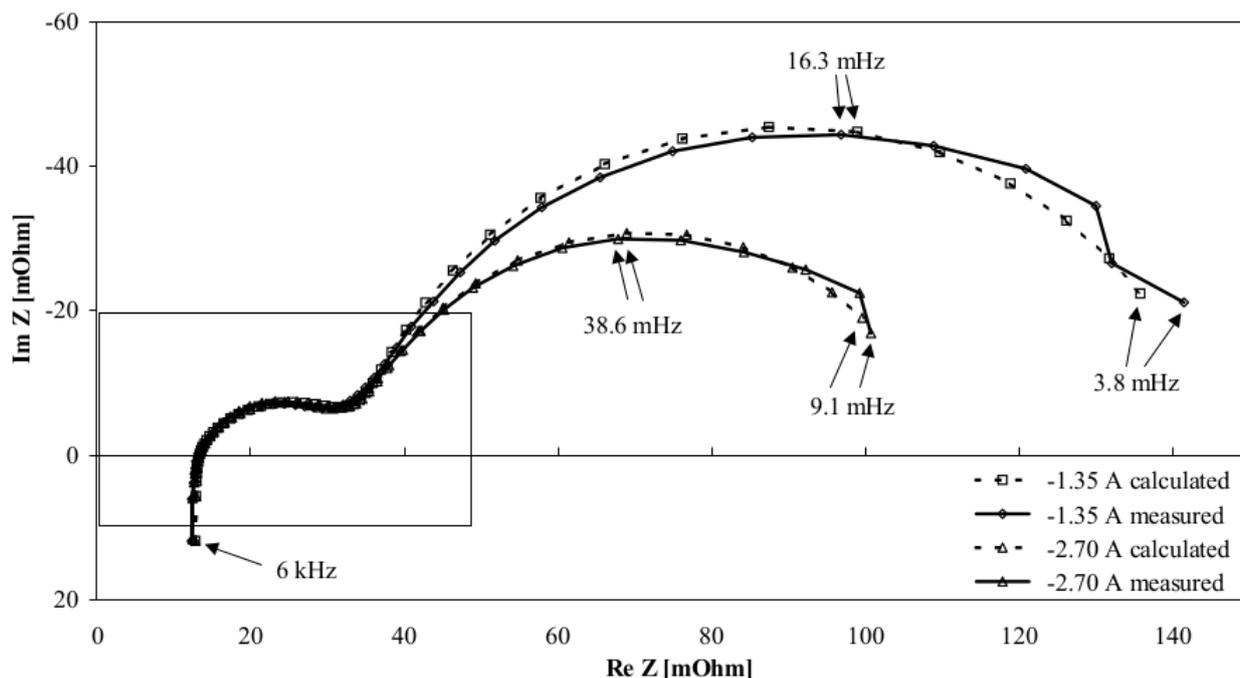


Figura 3.32: Impedância equivalente de pequenos sinais para uma bateria chumbo ácido de 36[V], 27,5[A.h], com 70% de nível de carga, operando à temperatura de 25°C e correntes DC de descarga de 1,35 e 2,70[A]. Reproduzido de Buller [15].

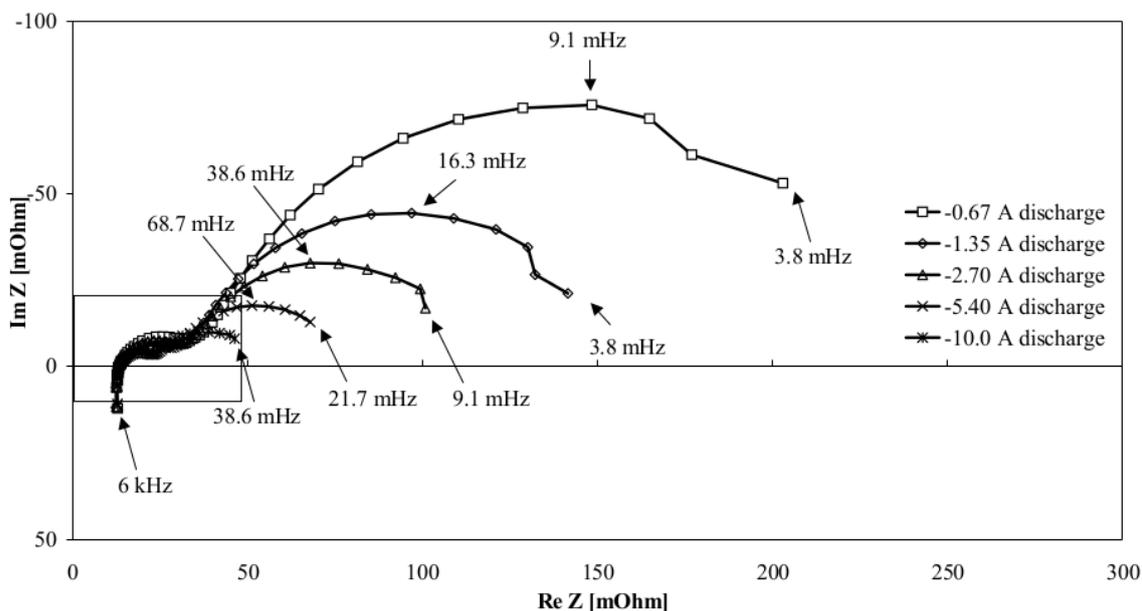


Figura 3.33: Impedância equivalente de pequenos sinais para uma bateria chumbo ácido de 36[V], 27,5[A.h], com 70% de nível de carga, operando à temperatura de 27°C e diferentes níveis de correntes DC de descarga. Reproduzido de Buller [15].

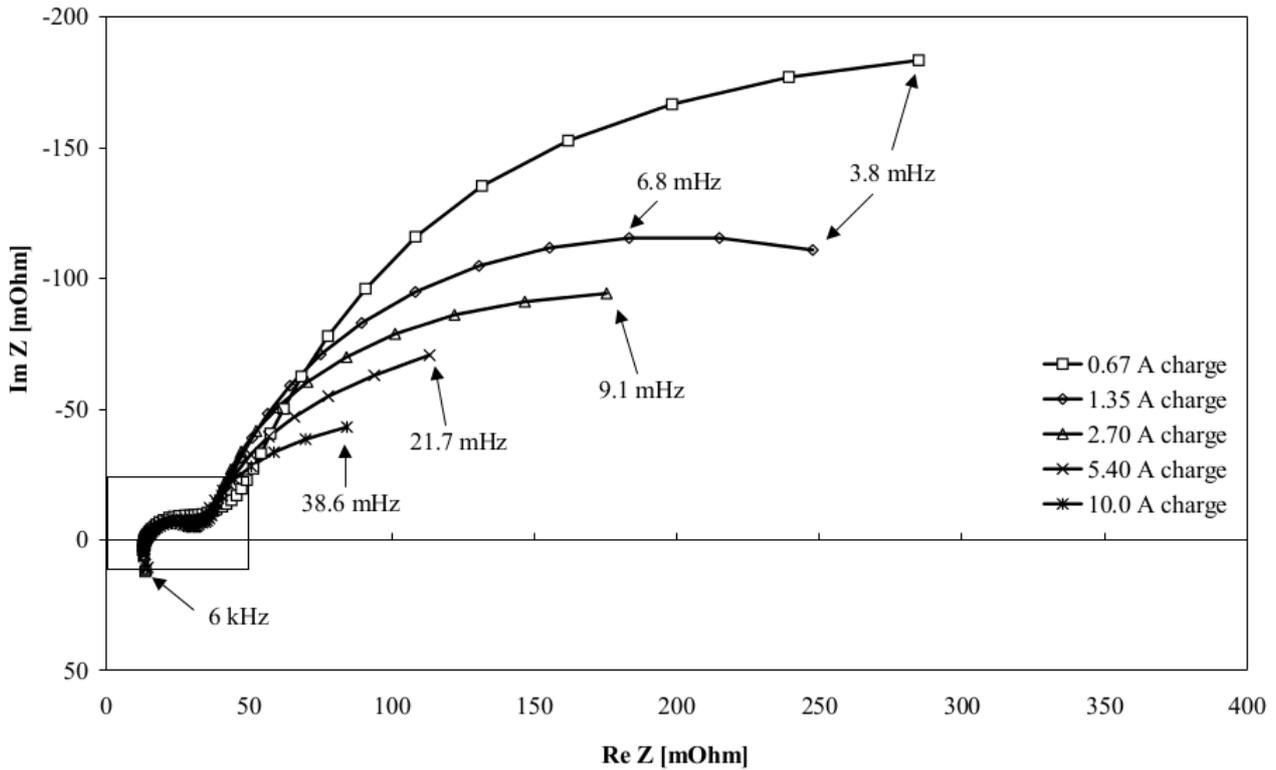


Figura 3.34: Impedância equivalente de pequenos sinais para uma bateria chumbo ácido de 36[V], 27,5[A.h], com 70% de nível de carga, operando à temperatura de 27°C e diferentes níveis de correntes DC de carga. Reproduzido de Buller [15].

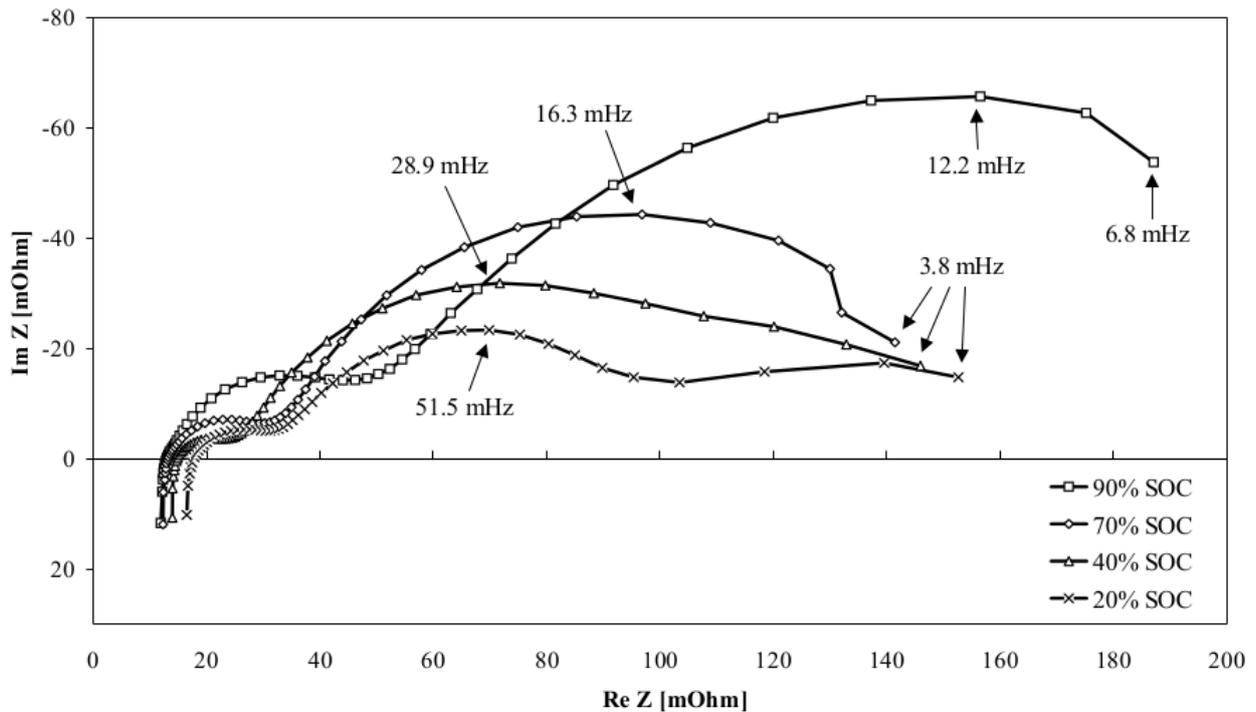


Figura 3.35: Impedância equivalente de pequenos sinais para uma bateria chumbo ácido de 36[V], 27,5[A.h], operando à temperatura de 27°C, com corrente de descarga igual a 1,35[A] e diferentes níveis de estado de carga. Reproduzido de Buller [15].

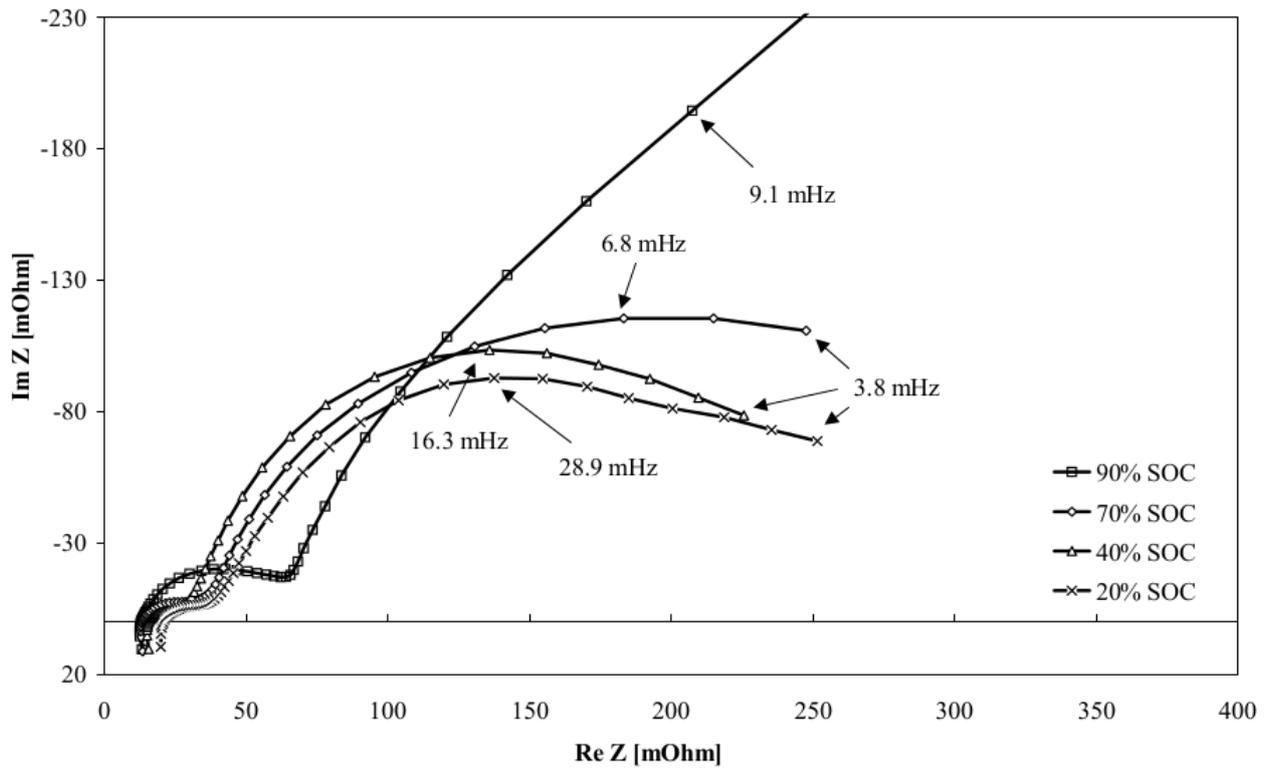


Figura 3.36: Impedância equivalente de pequenos sinais para uma bateria chumbo ácido de 36[V], 27,5[A.h], operando à temperatura de 27°C, com corrente de carga igual a 1,35[A] e diferentes níveis de estado de carga. Reproduzido de Buller [15].

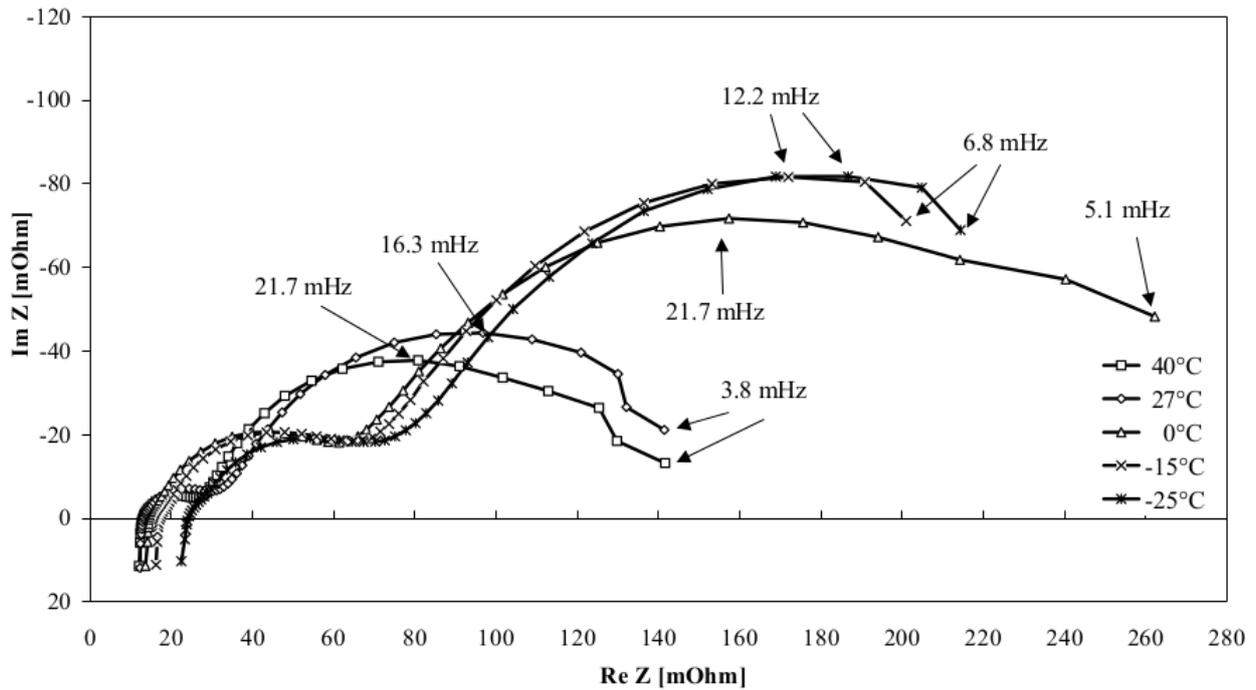


Figura 3.37: Impedância equivalente de pequenos sinais para uma bateria chumbo ácido de 36[V], 27,5[A.h], operando à corrente DC de carga igual a 1,35[A], e com diferentes temperaturas de operação. Reproduzido de Buller [15].

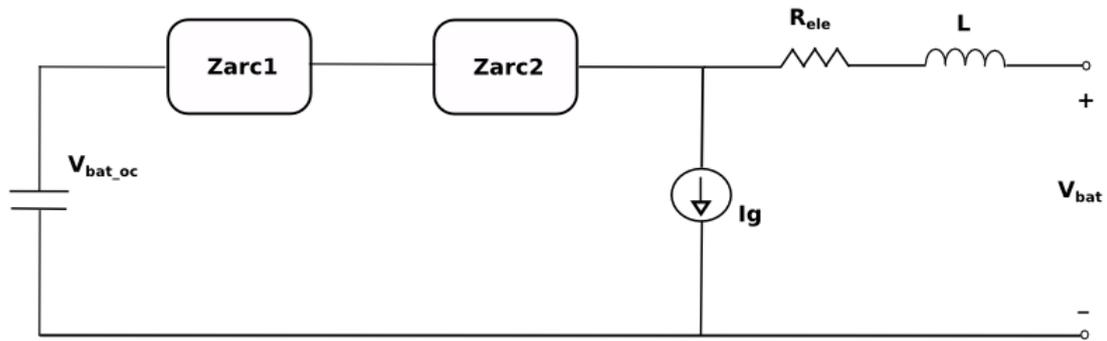


Figura 3.38: Circuito equivalente simplificado da bateria, onde as impedâncias são representadas por associações RC com resistência variável com a frequência.

Tal como mostrado nas figuras 3.32 a 3.37, mesmo embora tenham sido variados os níveis DC de carga e descarga da bateria, bem como sua temperatura e seu estado de carga, as impedâncias das baterias apresentam o formato de dois arcos no diagrama de Nyquist. Além disso todos os diagramas mostram que, em frequências próximas a 1kHz, o comportamento das baterias é predominantemente resistivo. Como no caso do Vecarr tais baterias alimentarão um inversor operando com frequência de chaveamento próxima a 1kHz, conclui-se que o seu comportamento para as componentes espectrais de corrente em torno da frequência de chaveamento será basicamente resistivo. Assim sendo, para tais componentes espectrais, o circuito equivalente da Figura 3.31 pode ser simplificado à uma associação contendo o capacitor principal ($V_{bat_{oc}}$) e um resistor variável.

Além disso, a potência ativa transferida ao veículo irá demandar corrente da bateria com dinâmica lenta, pois o usuário transporta o veículo em longos intervalos de tempo com conjugado constante aplicado ao eixo. Isso ocorre porque as componentes que são sobrepostas para caracterizar o conjugado mecânico total possuem dinâmica muito lenta, tal como destacado a seguir para cada uma dessas componentes:

- A componente de conjugado gravitacional varia com a inclinação das ruas por onde o veículo circula e a taxa de variação dessa inclinação é lenta, uma vez que a velocidade de deslocamento também é;
- O conjugado aerodinâmico nessa aplicação é basicamente nulo, pois tal conjugado varia com o quadrado da velocidade e a última é muito baixa;
- O conjugado Coulombiano de atrito estático nos mancais só depende da massa embarcada, a qual é constante durante o deslocamento do veículo à velocidade não-nula;

- Por último, o conjugado de aceleração imposto pelo usuário é variável, mas sua variação possui dinâmica lenta pois é imposta por seres humanos, e essa parcela se extingue rapidamente quando o usuário atinge a velocidade desejada de cruzeiro;

Assim sendo, para a aplicação em questão, a maior parte da energia consumida como calor na bateria será devido à componentes contínuas de corrente em seus terminais, o que também permite simplificar o circuito equivalente da bateria mostrado na Figura 3.31 como sendo uma fonte de de tensão em série com um resistor variável.

Mediante a última análise, tanto a componente DC da corrente na bateria quanto a componente na frequência de chaveamento podem ser analisadas como um circuito com uma fonte de tensão e um resistor. Para as componentes DC, porém, o circuito possui uma resistência maior, tal como mostrado nos diagramas de Nyquist das figuras 3.32 a 3.37. Tal conclusão também pode ser extraída do circuito equivalente da Figura 3.31, uma vez que as componentes de alta frequência possuem impedância nula nas associações RC enquanto, nas mesmas associações, as componentes DC possuem impedância igual a dos respectivos resistores. Assim sendo, para fins de avaliação do estado de carga e da tensão terminal da bateria, a mesma será considerada como uma associação entre uma fonte de tensão de circuito aberto e um resistor onde, o valor da resistência, será igual àquele observado pela componente DC que circula na bateria. Essa abordagem produzirá um erro de pequena magnitude na estimativa dos níveis de carga e da tensão terminal da bateria durante a dinâmica do conjugado de aceleração mas, como tal conjugado possui dinâmica lenta, tem curta duração e a corrente demandada por ele é baixa frente às demais componentes, o referido erro se configura como sendo um baixo custo frente ao benefício de poder se comparar o desempenho de diversas baterias sem ter que comprá-las e levantar seus respectivos circuitos equivalentes, o que também demandaria o alto custo de aquisição de um aparelho de espectroscopia.

Modelando-se a bateria como uma fonte de tensão em série com uma resistência, é possível se extrair a carga nominal do capacitor que representa a fonte de tensão. Não há porém como extrair a resistência equivalente exata para cada nível de corrente de descarga de dados de catálogos. Assim sendo, será utilizado o valor de resistência interna mostrada em catálogos [71] para avaliar o desempenho das baterias candidatas na plataforma de simulação.

Para avaliar a variação da tensão e do nível de carga das baterias mediante o consumo de sua energia no tempo, serão utilizadas tabelas de fabricantes que mostram o tempo de descarga de cada bateria de acordo com a corrente em seus terminais. Como exemplo, as informações de nível de descarga para a bateria 12V/5A.h da família Haze [71], é mostrada na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Tabela com as correntes contínuas de descarga e os respectivos tempos de descarga para a bateria Haze 12[V]/5[A.h] atingir a tensão final de 10,5[V] a partir da tensão inicial de 12[V].

tempo para descarga (minutos)	5	10	15	20	25	30	35	40	45
corrente de descarga (A)	18,2	11,1	8,5	7,03	6,03	5,29	4,73	4,25	3,85
tempo para descarga (horas)	1	1,5	2	3	4	5	10	20	
corrente de descarga (A)	3,01	2,16	1,78	1,28	1,00	0,88	0,48	0,25	

A partir das informações da Tabela 3.7, do nível de corrente nos terminais da bateria e do tempo em que tal nível de corrente circula, é possível calcular o percentual de descarga da bateria para aquele intervalo de tempo. Essa ideia é ilustrada na Figura 3.39.

A partir da avaliação do nível de descarga que cada solicitação de corrente da carga impõe à bateria, é possível prever a variação de sua tensão interna. Para isso, propõe-se verificar qual é a fração que o referido nível de descarga representa dentro da carga total armazenada e, considerando a fonte interna da bateria como sendo um capacitor, calcular a variação da tensão pela fração da carga total que fluiu de seus terminais. Mediante tais considerações, é possível simular o comportamento da bateria levando-se em conta a variação da tensão em seus terminais com a extração de sua energia, bem como levando-se em conta o comportamento de sua impedância interna.

Como o número de ciclos de recarga das baterias Chumbo-ácido aumenta se as mesmas forem expostas a percentuais menores de descarga, serão simulados os comportamentos de diversas baterias utilizando-se as mesmas para alimentação do acionamento elétrico que desenvolva os ciclos de trabalho dos catadores de papel. Será então escolhida a bateria que apresenta o menor nível de descarga nesses ciclos. Para tal simulação, será utilizada a estrutura de simulação mostrada na Figura 3.28, porém sintetizando-se a tensão no motor através de um modulador PWM. Considerando os comandos aplicados às chaves, a corrente nos terminais da bateria será dada pela expressão 3.18, tal como apresentado por Holmes [35].

$$I_{bat}(t) = s_1 \cdot i_{sa}(t) + s_2 \cdot i_{sb}(t) + s_3 \cdot i_{sc}(t) \quad (3.18)$$

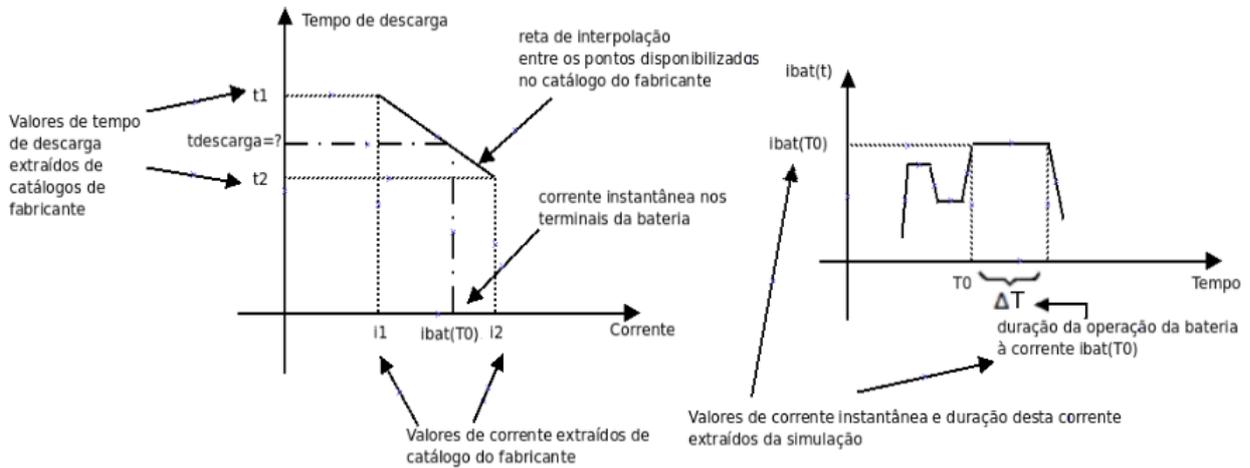


Figura 3.39: Estratégia para avaliação do percentual de descarga da bateria baseado na corrente em seus terminais, na duração dessas correntes e nas tabelas de fabricantes.

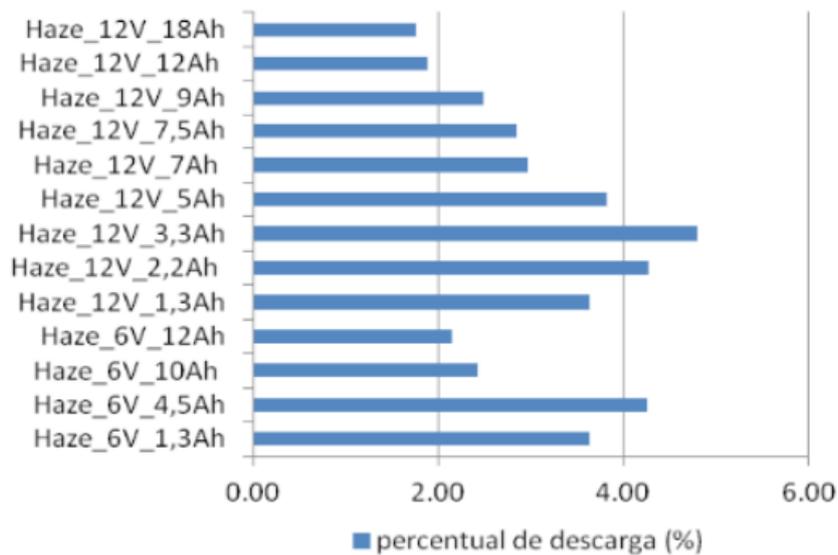


Figura 3.40: Nível de descarga de cada uma das 13 baterias avaliadas e aplicadas ao 1º trajeto monitorado nas ruas. Duração do trajeto: 12500 segundos.

Para avaliar o nível de descarga de 13 baterias da família Haze [71], aplicou-se a estratégia mostrada na Figura 3.39 para os níveis de corrente avaliados na simulação baseada no diagrama de blocos da Figura 3.28. Cada uma das baterias foi avaliada para cada um dos 9 ciclos de trabalho de catadores de papel monitorados em campo. O acionamento das simulações foi baseado no motor de 0,5cv, 220V, 1715rpm, 60Hz, especificado na seção 3.2 desse trabalho. Os níveis de descarga das baterias candidatas para 4 trajetos são apresentados nas figuras 3.40, 3.41, 3.42 e 3.43. Tal como mostrado na estratégia para seleção dos motores – seção 3.2 – foram utilizados os sinais de força e velocidade reais impostos pelos catadores nos 9 ciclos de trabalho monitorados para gerar as referências de força e velocidade utilizadas nas simulações destinadas à avaliação de descarga das baterias.

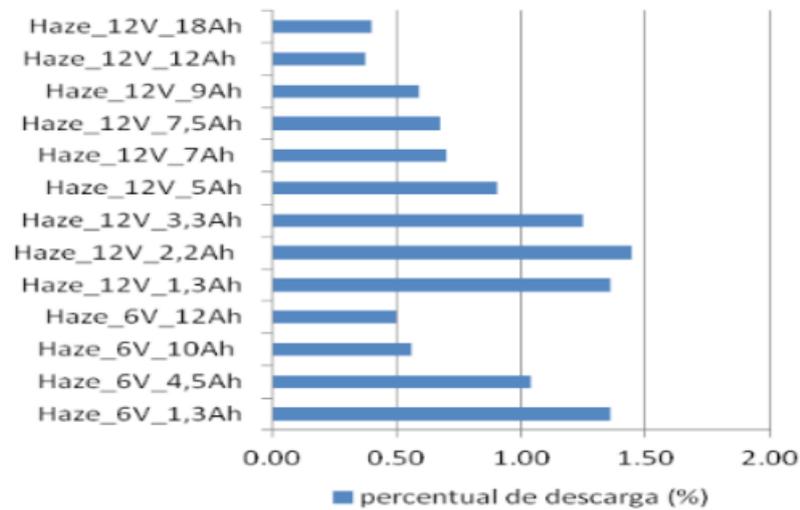


Figura 3.41: Nível de descarga de cada uma das 13 baterias avaliadas e aplicadas ao 2º trajeto monitorado nas ruas. Duração do trajeto: 1223 segundos.

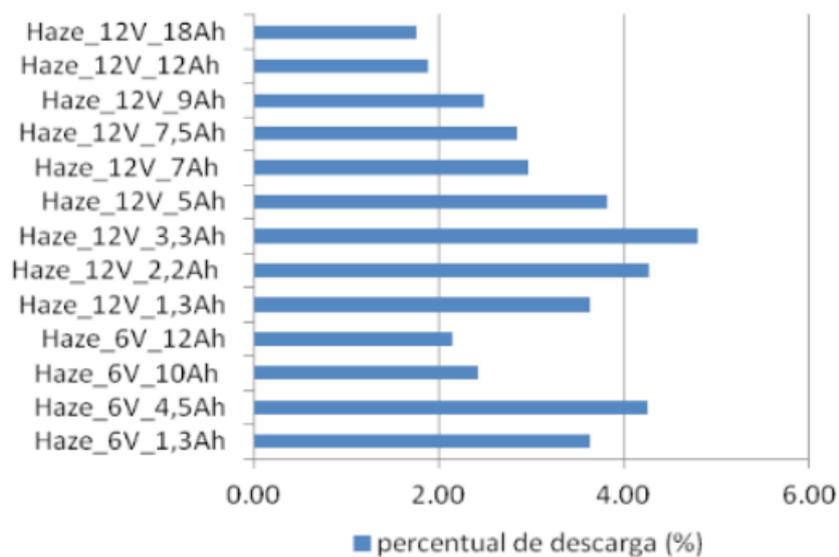


Figura 3.42: Nível de descarga de cada uma das 13 baterias avaliadas e aplicadas ao 3º trajeto monitorado nas ruas. Duração do trajeto: 5145 segundos.

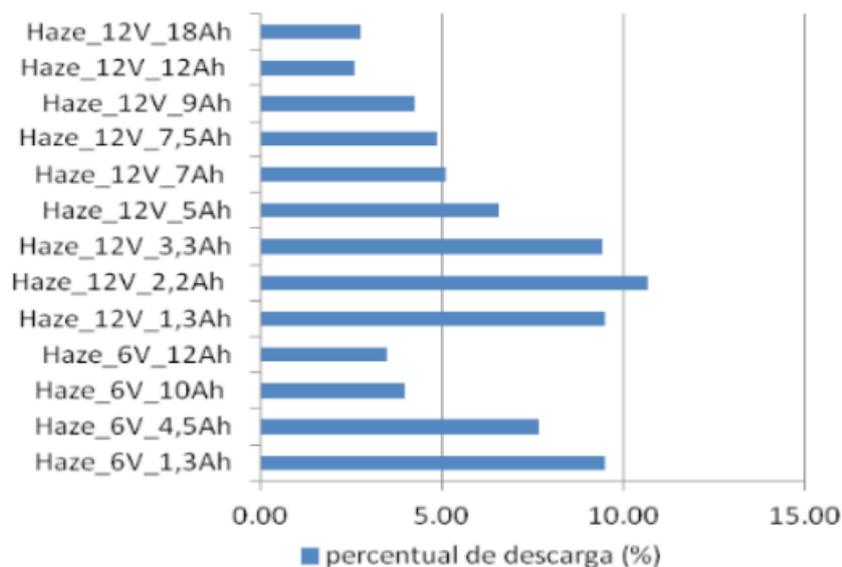


Figura 3.43: Nível de descarga de cada uma das 13 baterias avaliadas e aplicadas ao 4º trajeto monitorado nas ruas. Duração do trajeto: 5729 segundos.

Para concluir a eleição da bateria mais adequada ao acionamento, foram somados os níveis de descarga de cada bateria para todos os trajetos monitorados dos catadores de papel. Após tal soma, concluiu-se que a bateria de menor percentual de descarga dentre as candidatas avaliadas é a de 5A.h, 12V. Portanto, o barramento CC será composto de 26 baterias dessa especificação ligadas em série.

3.4 Especificação da transmissão mecânica

A transmissão mecânica será escolhida seguindo-se a estratégia proposta por Boyali *et al* [13] para determinar o gerenciamento do fluxo de potência em veículos elétricos híbridos paralelos. Nesses sistemas, os conjugados dos motores à combustão e elétrico são somados na entrada de um primeiro estágio de transmissão, ou então cada motor aciona em separado o conjunto de rodas dianteira e traseira. O critério para escolha da parcela do conjugado total desenvolvido por cada motor se dá com base na demanda da carga e na tentativa de se operar a máquina à combustão em sua região de máxima eficiência, uma vez que o combustível fóssil é a fonte primária embarcada mais cara.

No contexto do Vecarr, o conjugado total de acionamento é praticamente todo desenvolvido pelo acionamento elétrico. Assim sendo, a transmissão mecânica será escolhida para compatibilizar a demanda de conjugado e velocidade impostos pelo usuário e pelos demais elementos externos à região de conjugado e velocidade onde a máquina elétrica trabalha com máxima eficiência. Seguindo a filosofia do presente estudo onde o veículo se deslocará sem a necessi-

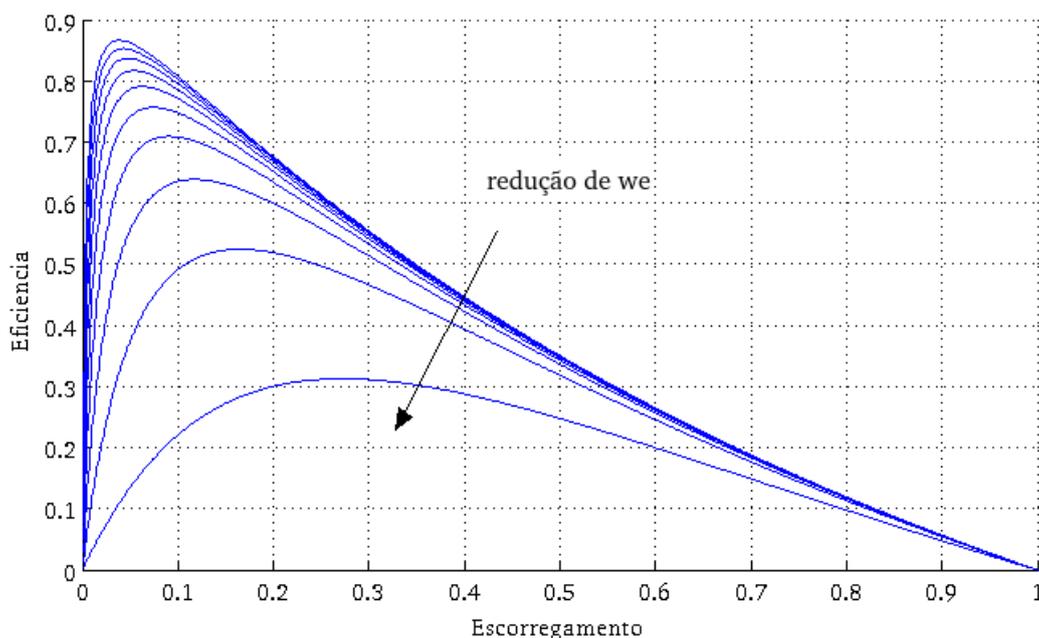


Figura 3.44: Eficiência x escorregamento para diferentes frequências síncronas e razão V/f constante.

dade de treinamento do seu condutor, será implantado uma única relação de transmissão, de tal forma que não exista a necessidade de troca de marchas pelo usuário. Outra opção seria a instalação de um câmbio automático, o qual viabilizaria mais marchas e não demandaria a troca das mesmas pelo condutor. Essa opção, porém, possui custo proibitivo para o público alvo das aplicações do Vecarr. Além disso, com a aplicação do inversor de frequência, é possível se operar em ampla faixa de velocidades dentro da região de escorregamento nominal, eliminando-se assim a necessidade de uma ampla gama de razões de transmissão que sempre levem a operação ao ponto de máxima eficiência.

Como as inclinações das ruas, a massa de carga embarcada e a aceleração desejada pelo usuário não são constantes, há variação na velocidade e no conjugado de carga impostos ao eixo da roda. O conjugado de carga, porém, possui taxa de variação muito lenta, pois sua principal componente é a gravitacional. Tal componente depende da massa embarcada, a qual não varia durante o deslocamento, e da inclinação dos morros, a qual varia muito lentamente para as velocidades típicas de traslado. Assim sendo, o sistema opera com conjugado de carga basicamente constante durante longos intervalos de tempo. Como tal parcela de conjugado possui dinâmica lenta, o sistema de controle conseguiria rejeitá-la operando com controle escalar ou V/f constante. Para então se avaliar a eficiência da máquina em função do escorregamento para diferentes frequências e V/f constante, apresenta-se na Figura 3.44 as curvas de eficiência da máquina em função do escorregamento para diferentes frequências síncronas.

Como mostrado na Figura 3.44, a máxima eficiência possível dentre todas as frequências

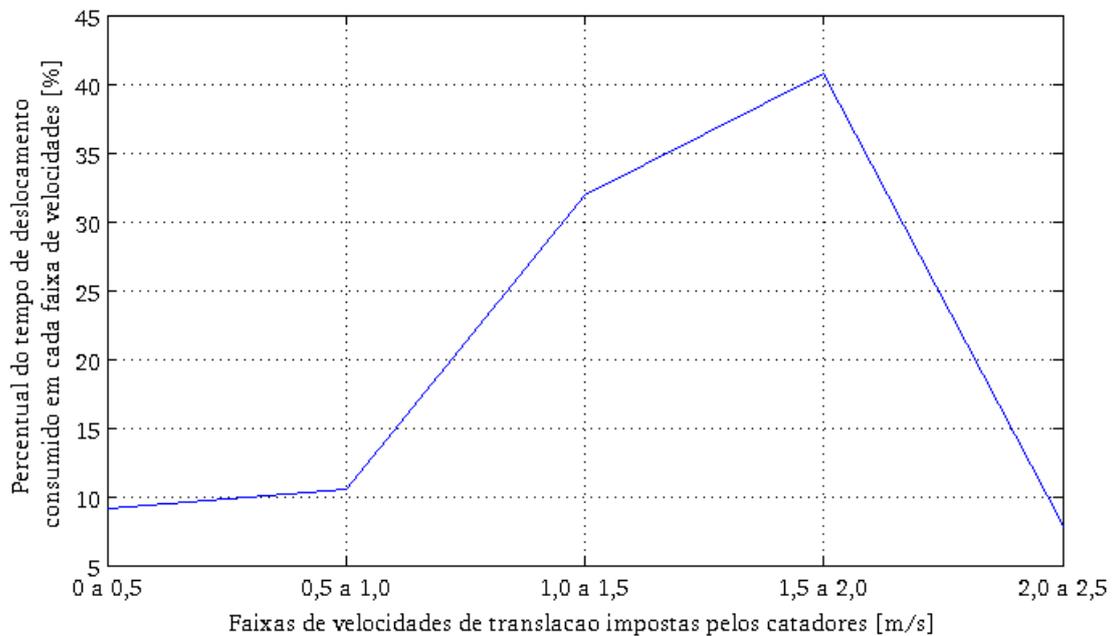


Figura 3.45: Percentual do tempo total de deslocamento gasto em algumas faixas de velocidades de translação.

síncronas avaliadas ocorre para frequência síncrona nominal. Assim sendo, a transmissão escolhida irá fazer com que, na maior parte do tempo de deslocamento, o motor opere próximo a frequência síncrona nominal.

Para tal avaliação, apresenta-se na Figura 3.45 o percentual do tempo em movimentação que os catadores monitorados transladaram nas faixas de velocidade compreendidas entre 0 a 0,5m/s; 0,5 a 1,0m/s ; 1,0 a 1,5m/s ; 1,5 a 2,0 m/s e 2,0 a 2,5m/s;

Tal como apresentado na Figura 3.45, de todas as medições efetuadas em campo, durante 40,7% do tempo total em deslocamento o condutor impõe uma velocidade de translação entre 1,5 e 2,0m/s. Como essa faixa é a de maior tempo de permanência e de maior consumo de energia, a transmissão mecânica será escolhida para que, no valor máximo dessa faixa de velocidades, o motor opere à velocidade de 1720 rpm.

Como o raio da roda dos veículos monitorados em campo é de 12,5cm, a faixa de velocidades angulares no eixo da roda imposta pelos usuários para velocidades de 1,5 a 2,0 m/s situa-se entre 114,6 a 152,8rpm. Para fazer com que o motor elétrico opere a 1720rpm quando a velocidade na roda é de 152,8rpm, é necessária uma transmissão de razão 1:11,3.

3.5 Conclusões

Nesse capítulo foram apresentadas metodologias destinadas à especificação dos elementos de potência que equipam o Vecarr. Apesar de tais elementos – motores, baterias e transmissão

Tabela 3.8: Elementos de potência especificados para tracionar a aplicação dos catadores de papel de São João del Rei.

EQUIPAMENTO	ESPECIFICAÇÃO
Máquina de indução	Rotor em gaiola, trifásica, 370W, 220V, 2,05A, 1720 rpm, fixação pela base, formato B3D ou B3E, categoria N, fator de serviço 1.0, classe de isolamento B, auto-ventilado.
Banco de baterias	28 baterias Chumbo-Ácido seladas, cada uma delas especificada em 12V, 5A.h, 1,8kg, conector soldável.
Transmissão mecânica	Relação total de 11,3:1 implementada em dois estágios. Primeiro estágio com polias, relação 4:1 . Segundo estágio implementado com coroa e pinhão, relação 3:1.

mecânica – serem amplamente disponíveis em mercado, não há uma vasta gama de trabalhos que proponham métodos de escolha para tais elementos em situações onde os ciclos de carga e os níveis de potência sejam diferentes daqueles apreciados em plantas mecatrônicas industriais. Do metodologia desenvolvida e considerando como cenário exemplo os ciclos dos catadores de papel de São João del Rei, apresenta-se na Tabela 3.8 os elementos de potência especificados.

Assim sendo, para a escolha do motor elétrico, foram avaliados dentre diversos candidatos aquele que seria capaz de tracionar os ciclos de trabalho avaliados consumindo-se a mínima energia possível, tendo capacidade de conjugado máximo maior que os picos demandados na aplicação, garantindo operação na região linear entre corrente e conjugado e garantindo a sua máxima temperatura de operação dentro do limite imposto pela classe de isolamento da máquina. Nesse estudo concluiu-se que um motor de indução trifásico de 0,5cv/220V seria suficiente para tracionar a aplicação. Como parâmetro de comparação, o motor à combustão do projeto Recicar [81] destinado à mesma plataforma foi especificado em 5cv, sendo tal número obtido pela especificação do motor baseado na situação de pico de demanda de conjugado. Durante a reprodução da rotina dos catadores de papel em plataforma de simulação, destacou-se a apresentação de uma metodologia inovadora para estimativa do conjugado de carga no eixo do motor. Tal estimativa foi pautada na utilização de medições de força por célula de carga, velocidade por GPS e no uso do controle vetorial de máquinas de indução. Pautado nesses parâmetros, foi possível dispensar intervenções mecânicas para acoplamento de sensores de posição ou velocidade angular no eixo do motor, bem como se dispensou a informação da massa embarcada e da inclinação das ruas transitadas para reprodução do conjugado de carga. Destaca-se também a formação de uma base de dados sobre os trajetos, esforços e configurações mecânicas desenvolvidos pelos catadores de papel monitorados. Essa base de dados pode ser aplicada em outros ramos de exploração científica, donde podem ser citados os profissionais de educação

física, fisioterapia, ortopedia, meio ambiente e até mesmo órgãos do governo interessados no mapeamento de trajetos potenciais para aquisição de material reciclável.

Para a especificação do banco de baterias, foram correlacionados os modelos de baterias explorados em teses de doutorado, os dados de catálogo fornecidos por fabricantes e as características da corrente demandada da bateria quando a mesma é aplicada à entrada de um inversor que alimenta o motor de indução do Vecarr. A demanda de corrente do motor foi obtida pela simulação do acionamento elétrico baseado no motor de indução eleito, o qual é especificado em $0,5\text{cv}/220\text{V}$, e que recebeu como demanda de conjugado os esforços aplicados pelo condutor e pela gravidade nos trajetos monitorados para os catadores de papel. Nesse estudo foram extraídos, para diversas baterias candidatas, os níveis instantâneos de descarga para cada solicitação de corrente da aplicação. Foi então selecionada a bateria que apresentou um menor nível de descarga total quando a mesma foi aplicada à simulação de todos os trajetos monitorados.

Para a escolha da razão de transmissão mecânica, foi adotada a mesma estratégia adotada em alguns trabalhos científicos na área de veículos híbridos. Tal estratégia prioriza a compatibilização entre as demandas de conjugado e velocidade da aplicação com a operação da fonte de potência mais cara na sua região de maior eficiência. Para o caso de veículos híbridos, a fonte de potência mais cara é o combustível fóssil embarcado, e a transmissão compatibiliza as demandas do usuário com a região de máxima eficiência do motor à combustão. No caso do Vecarr, a transmissão foi escolhida para compatibilizar a região de máxima eficiência do motor elétrico selecionado com os níveis de conjugado e velocidade demandados pelo usuário na maior parcela de tempo. Tal estratégia garante máxima autonomia ao veículo, permitindo que usuários que utilizem o Vecarr nas ruas possam andar em trajetos mais extensos e/ou coletar mais material até voltar ao ponto de recarga das baterias, o que potencializa o aumento de ganhos financeiros de tais profissionais.

A metodologia para especificação dos motores de indução apresentada nesse capítulo resultaram na publicação de um artigo em conferência e outro em revista. Tais artigos são apresentados nos apêndices A e C.

Capítulo 4

Projeto do Sistema de Controle

O Vecarr, como sendo um corpo no espaço, tem seu comportamento descrito por uma impedância mecânica, ou seja, um sistema massa-mola-amortecedor equivalente. Com a inserção das malhas de controle e atuador, há a possibilidade de se fazer com que o Vecarr emule a impedância mecânica de outros corpos, cenário no qual ele se comporta como uma impedância mecânica ativa. Nessa abordagem, os ganhos das malhas de controle passam a atuar sobre os parâmetros de trajetória mecânica do veículo, fazendo com que se possa controlar a percepção humana no contato, bem como o modo operante do veículo. Seguindo essa ideia, serão apresentadas nesse capítulo duas estratégias de controle para o Vecarr. Na primeira delas, o sistema será ajustado para priorizar a qualidade de contato percebida pela pessoa que conduz o veículo. No contexto desse estudo, a qualidade de contato é um indicador caracterizado pela percepção da pessoa se o veículo é tranquilizante, flexível, agradável e com comportamento similar ao de humanos. Na segunda estratégia de controle, o sistema será ajustado para priorizar o desenvolvimento de velocidades finais mais elevadas, de tal forma a atender usuários que demandam a saída de situações de emergência, bem como priorizam ganhos financeiros com deslocamentos em velocidades finais mais elevadas. Mesmo permitindo tais velocidades, o sistema será configurado para que a dinâmica de alteração da mesma, apesar de ser controlada pela dinâmica da força do condutor, não provoque atropelamentos ao mesmo. Para a última funcionalidade, será estudada a dinâmica de força dos braços, os quais impõe força ao veículo, e das pernas, as quais impõe força de tração ao condutor. Se o veículo responder a comandos dos braços com a dinâmica dos mesmos, as pernas do condutor não conseguem acompanhar o veículo, e tal ponto será analisado e tratado.

Conforme avaliado na revisão bibliográfica do capítulo 2, os trabalhos científicos da área de cooperação homem-robô utilizam as informações do modelo do robô e dos demais elementos da

malha de controle. Assim sendo, o capítulo será iniciado com a modelagem do Vecarr, sendo utilizado para isso o modelo de impedâncias ou modelo em forma canônica. Alguns elementos geométricos desse modelo serão extraídos por modelagem tridimensional na plataforma Solid Works. Após tal modelagem, serão avaliadas as dinâmicas de resposta dos braços e pernas de pessoas com o objetivo de se modelar sua forma de cooperação com o veículo. Com o modelo do veículo e tendo sido caracterizadas a imposição da intenção humana de movimento, serão apresentadas as duas estruturas de controle propostas.

4.1 Modelo dinâmico do Vecarr

Da revisão bibliográfica apresentada no capítulo 2 observou-se que, na comunidade científica atuante na área de cooperação homem-robô, há um grande número de trabalhos cujos sistemas de controle são baseados no modelo de impedâncias mecânicas ou, similarmente, modelo em forma canônica [63], [23], [9], [16], [79], [60], [33].

A síntese desses sistemas de controle é feita a partir das melhores estimativas possíveis dos parâmetros geométricos e de distribuição de massa do robô. Seguindo essa ideia, o sistema de controle do Vecarr também será baseado no conhecimento dos parâmetros de sua impedância mecânica. Como apresentado por Choset *et al* [23], tais parâmetros são dados por matrizes de massa ($M(\vec{q}, \dot{\vec{q}})$), de termos centrífugos e de Coriolis ($b(\vec{q}, \dot{\vec{q}})$) e de termos potenciais ($g(\vec{q})$) e, a partir da caracterização dos mesmos, a descrição do modelo do corpo em forma canônica possui o formato apresentado na equação 4.1.

$$\vec{F} = M(\vec{q}, \dot{\vec{q}}).\ddot{\vec{q}} + b(\vec{q}, \dot{\vec{q}}).\dot{\vec{q}} + g(\vec{q}) \quad (4.1)$$

Tal como apresentado por Pereira e Torres [63], a caracterização do modelo de impedâncias ou em forma canônica demanda, inicialmente, a distinção dos corpos constituintes do robô. Nesse trabalho, o modelo do veículo será feito assumindo-se que o mesmo é constituído por três corpos, os quais são destacados a seguir:

- 1º corpo: Conjunto chassis, guidão, baterias, eletrônica, carga útil;
- 2º corpo: Conjunto das rodas, pneu e eixo de tração;
- 3º corpo: Motor elétrico;

Tal como apresentado por Pereira e Torres [63], qualquer corpo rígido no espaço pode ser caracterizado por 6 variáveis, sendo 3 delas relativas à posição do seu centro de massa e mais

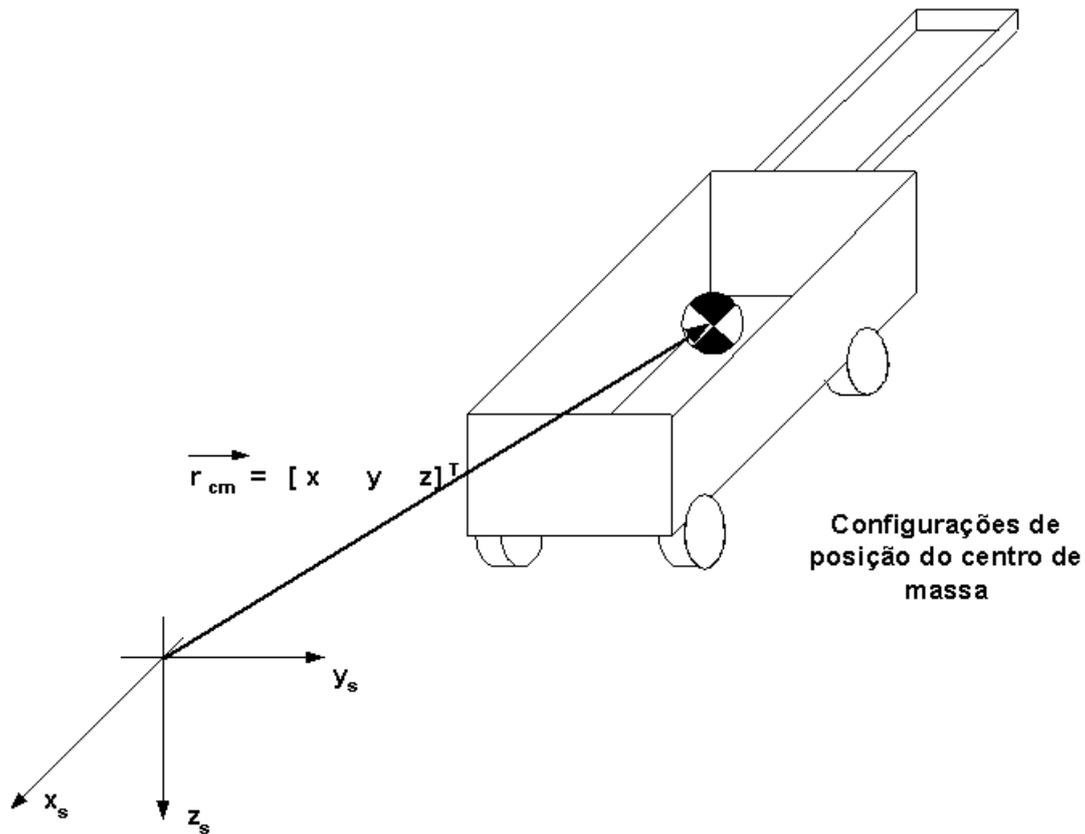


Figura 4.1: Configurações do centro de massa do chassi/carga útil.

3 relativas aos ângulos de atitude do corpo (guinagem, arfagem, rolamento). As figuras 4.1, 4.2 e 4.3 ilustram as configurações do centro de massa e das atitudes de guinagem e arfagem para o chassi/carga útil do Vecarr.

Assim sendo, os 3 corpos constituintes do Vecarr demandariam 18 variáveis de configuração para descrever totalmente sua orientação no espaço. Há, porém, restrições de movimento que reduzem o número de variáveis necessárias para descrever tais corpos. Essas restrições são listadas a seguir:

- 2 corpos – chassi/carga e motor - são rigidamente acoplados e a distância entre os seus centros de massa é constante. Assim sendo, a descrição de posição dos respectivos 3 centros de massa, a qual demandaria 6 variáveis, pode ser feita através da posição de um único centro de massa, ou seja, 3 variáveis. Tal restrição reduz o número de configurações de 18 para 15;
- nenhum dos 3 corpos pode rolar, pois assim o veículo capotaria. Essa restrição reduz o número de variáveis de configuração de 15 para 12;
- os 3 corpos são mecanicamente interconectados de tal forma que o ângulo de guinada dos 3 é sempre o mesmo. Tal restrição reduz o número de variáveis de configuração de 12

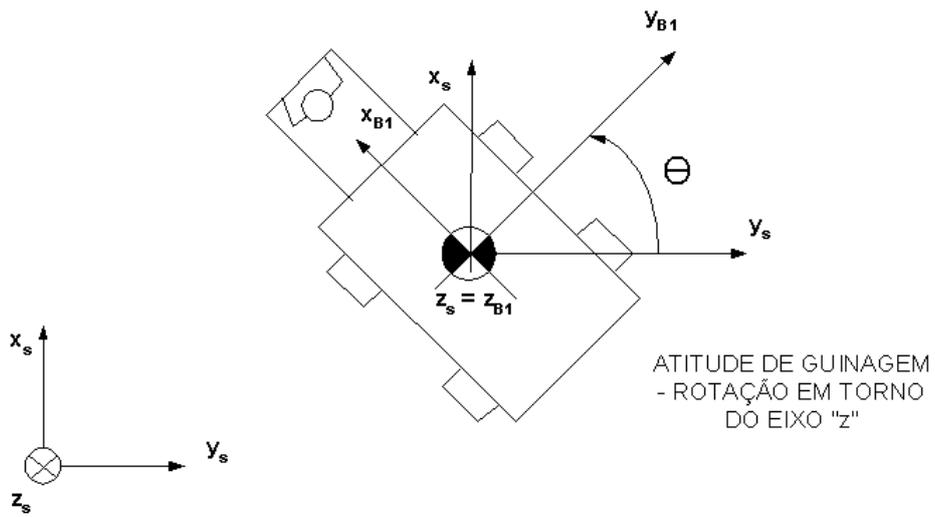


Figura 4.2: Configuração de guinagem do chassis/carga útil.

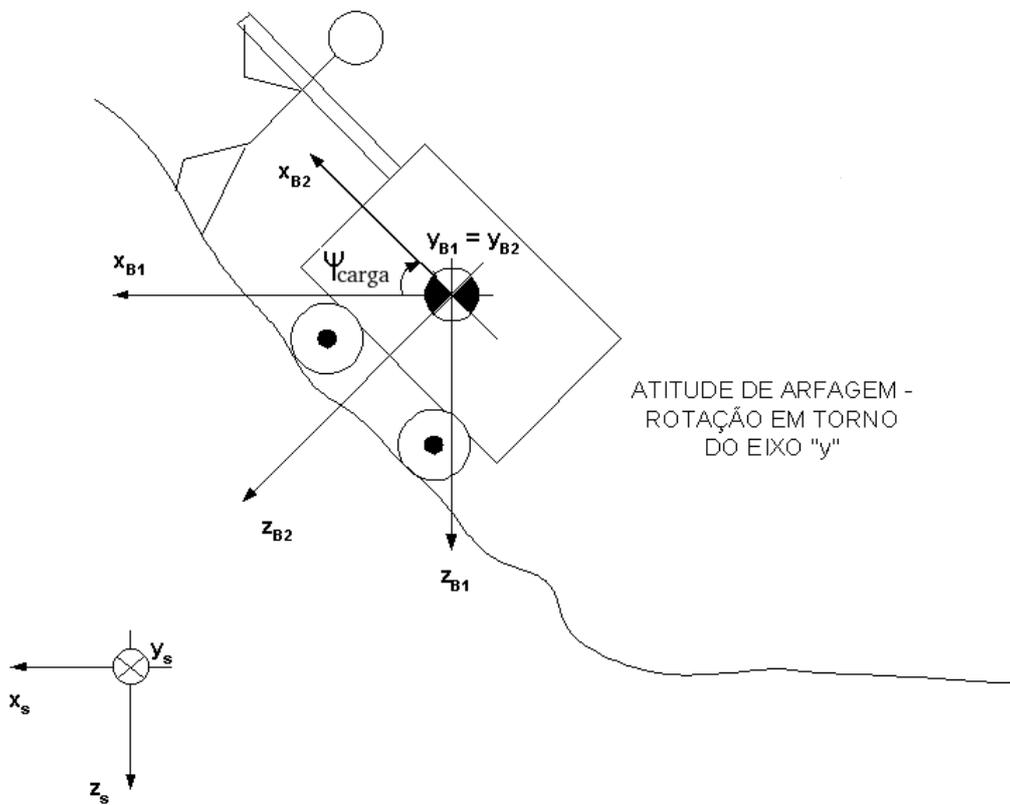


Figura 4.3: Configuração de arfagem chassis/carga útil.

para 10;

- os ângulos de arfagem do chassis e motor são os mesmos. Tal restrição reduz o número de variáveis de configuração de 10 para 9;
- como o veículo é terrestre e será assumido que o seu movimento será sem deslizamento, a posição angular da roda com relação ao eixo de tração – ângulo de rolamento – e o ângulo de guinada do veículo permitem definir completamente o deslocamento do corpo em superfícies planas e, assim sendo, definir também as posições x e y do centro de massa do eixo de tração ($x_{roda} = \psi \cdot r_{roda} \cdot \cos(\theta)$, $y_{roda} = \psi \cdot r_{roda} \cdot \sin(\theta)$). Tal restrição permite reduzir o número de variáveis de configuração para 7, sendo elas o ângulo de guinada de veículo (θ), os ângulos de rolamento da roda (ψ) e do chassis/carga útil (ψ_{carga}), as alturas do chassis/carga útil e da roda com relação ao referencial inercial (z_{carga} e z_{roda}) e as posições x e y do centro de massa do chassis/carga útil (x_{carga} e y_{carga});

A partir das 7 configurações identificadas, o modelo de impedâncias mecânicas demanda a caracterização das forças efetivas que atuam sobre cada configuração. Para isso, apresenta-se na Figura 4.4 as forças efetivas que atuam no chassis/carga útil e no eixo de tração do veículo.

Para obter o modelo do corpo a partir das forças efetivas apresentadas na Figura 4.4, é necessário identificar quais forças agem na direção de cada configuração. Como o principal objetivo de se caracterizar o modelo dinâmico é a sua aplicação no sistema de controle, o qual atua através do motor elétrico, o modelo será manipulado para que a influência das variáveis de configuração sejam referidas ao eixo de tração. Nessa estratégia para produção do modelo, destaca-se que na maior parte do tempo o sistema se deslocará em translação frontal, situação na qual o ângulo de guinada do veículo não interfere na dinâmica de translação. Assim sendo, se o veículo estiver se deslocando na direção x_s ou estiver guinado a 90° , ou seja, se deslocando na direção y_s do referencial inercial, serão observadas as mesmas dinâmicas de translação se as demais forças efetivas forem as mesmas, bem como será observado o mesmo comportamento para o sistema de controle. Portanto o modelo do Vecarr será desenvolvido assumindo-se deslocamento frontal do veículo, ou seja, tomando-se como base a Figura 4.3, será desenvolvido o modelo que contemple variações nas direções x e z dos centros de massa através da atuação do motor sobre a configuração de rolamento da roda (ψ).

Tal como mostrado na Figura 4.4, as forças dos atuadores do veículo são predominantemente alinhadas com o eixo x do referencial do corpo (x_B). Assim sendo, se as variáveis de configuração que conotam translação dos centros de massa forem descritas em um referencial

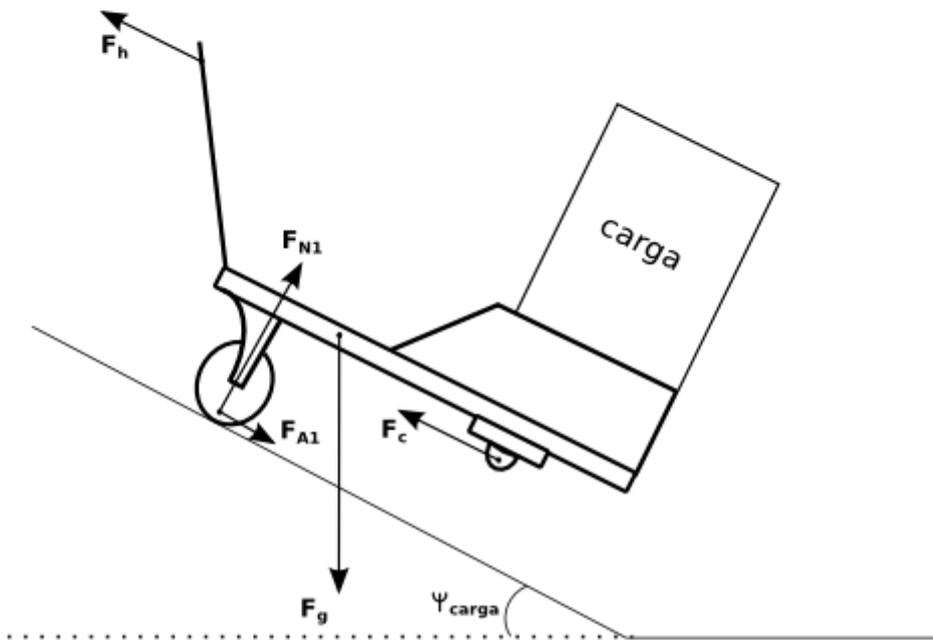
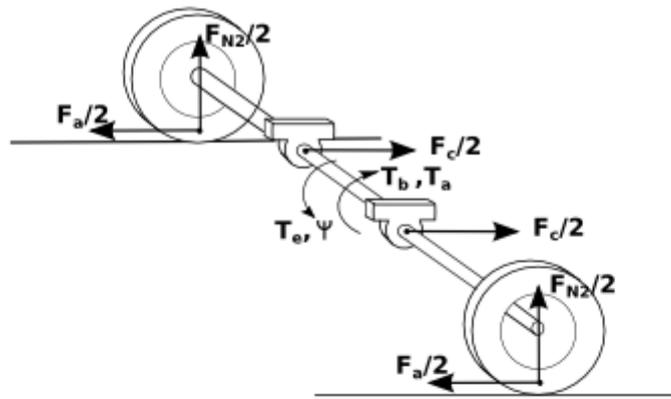


Figura 4.4: Diagrama de corpo livre destacando as forças efetivas que agem sobre as dinâmicas de arfagem do eixo de tração e de translação do chassi/carga útil.

paralelo ao referencial do corpo, a translação do último pode ser descrita por uma única equação dinâmica relativa ao eixo x_B . Para implementar a descrição das variáveis de configuração no referencial do corpo, seria necessário aplicar a operação de rotação ao vetor de configurações representado no referencial inercial, tal como mostrado na equação 4.2.

$$q_{B2}^{\vec{}} = R \cdot q_S^{\vec{}} \quad (4.2)$$

A aplicação da rotação apresentada na equação 4.2 permite reescrever a forma canônica da equação 4.1 da forma apresentada na equação 4.3.

$$\vec{F} = [M \cdot R^T] \cdot \ddot{q}_{B2}^{\vec{}} + [b \cdot R^T + 2 \cdot \dot{R}^T] \cdot \dot{q}_{B2}^{\vec{}} + [M \cdot \ddot{R}^T + b \cdot \dot{R}^T] \cdot q_{B2}^{\vec{}} \quad (4.3)$$

A equação 4.3 mostra que a representação das configurações do veículo em um referencial diferente não muda a estrutura do formato canônico do modelo de impedâncias. Como tal formato é generalizado, as mesmas conclusões aplicáveis à forma canônica para representação no referencial inercial são aplicáveis para o referencial paralelo ao referencial do corpo. Assim sendo, a dinâmica de cada configuração pode ser caracterizada a partir da determinação das forças que agem especificamente na direção de cada configuração, tal como a força de tração, a qual atua primordialmente paralela ao eixo x_B , tal como mostrado na Figura 4.4.

Com base na Figura 4.4, são destacadas a seguir as seguintes forças efetivas em cada configuração:

- a configuração de rolamento da roda (rotação da roda) será determinada pelo conjugado eletromagnético do motor referido ao eixo de tração (T_e), pelo conjugado viscoso presente no rolamento do mancal (T_b) e pelo conjugado desenvolvido pela força de atrito (T_a);
- a configuração do centro de massa do eixo de tração terá sua dinâmica determinada pelas forças de atrito (F_a), pela força de contato elástico entre o mancal e o eixo (F_c), pela força da gravidade (F_g);
- a configuração do centro de massa do chassi/carga útil terá sua dinâmica determinada pelas forças de contato com o eixo de tração (F_c), pela força aplicada pelo ser humano que conduz o veículo (F_h) e pela gravidade (F_g);

A variação no ângulo de arfagem do chassi ocorrerá quando houver conjugado no sentido do eixo que caracteriza tal atitude. Esse conjugado ocorrerá quando houver desequilíbrio entre as forças normais que atuam no veículo. Assim sendo, tal variação dependerá da distribuição

de massa e do relevo onde o Vecarr se desloca. Como o veículo se desloca com a velocidade imposta por pessoas, a taxa de variação do ângulo de arfagem é muito baixa e por conveniência à modelagem, o seu valor será assumido constante para ajuste das malhas de controle. Será considerado que seu efeito se dará pelas componentes normal e tangencial da gravidade, os quais atuarão sobre configurações distintas do veículo e que serão rejeitados pelo sistema de controle como distúrbios ao deslocamento imposto pela intenção humana.

A força que o atrito do solo impõe sobre o pneu, tal como mostrado na Figura 4.4 e na equação 4.6, é uma das responsáveis pela translação do veículo. Tal força é desenvolvida quando o motor impõe conjugado no eixo de tração, o qual empurra o solo para trás e o solo, por reação, empurra a roda e o eixo para frente. Quando o eixo é empurrado, ele empurra o rolamento, o qual empurra o mancal acoplado ao chassis/carga para frente através da deformação elástica do rolamento com o mancal no ponto de contato (F_c). Por reação, o eixo também recebe a mesma força de contato que ele transferiu ao veículo, porém em sentido contrário. Dessa maneira, em superfícies planas, o eixo e rodas de tração recebem esforços de translação pelo contato com o mancal e pelo atrito com o solo, e a diferença entre esses dois esforços determina a aceleração do centro de massa do conjunto eixo/rodas de tração. Para o corpo chassis/carga útil, além da força de translação desenvolvida pelo contato do mancal com o rolamento, há a força desenvolvida pelo condutor do veículo (F_h).

A força de contato F_c será modelada da maneira apresentada por Cao [16] em um exoesqueleto aplicado à perna humana. Nesse exoesqueleto, o contato entre a coxa e a estrutura robótica é modelada por um acoplamento elástico. Tal ideia será aplicado ao Vecarr e a força de contato entre o eixo de tração e o chassis terá o formato apresentado na equação 4.4.

$$F_c = K_{contato} \cdot (x_{carga} - x_{roda} - \Delta x_{repouso}) \quad (4.4)$$

Considerando o modelo do Vecarr apresentado na equação 4.1 e a descrição das forças efetivas que atuam no eixo de tração e roda mostradas na Figura 4.4, apresentam-se nas equações 4.5, 4.6 e 4.7 as dinâmicas de rolamento da roda, de deslocamento do centro de massa do eixo de tração e de deslocamento do centro de massa do veículo.

$$J \cdot \ddot{\psi} = T_e - T_{atrito} - T_b \cdot r_{roda} \quad (4.5)$$

$$M \cdot a_{roda} = F_{atrito} - F_c - M_{roda} \cdot g \cdot \text{sen}(\psi_{carga}) \quad (4.6)$$

$$M \cdot a_{carga} = F_c + F_h - M_{carga} \cdot g \cdot \text{sen}(\psi_{carga}) \quad (4.7)$$

Como há a restrição de não deslizamento frontal do veículo, as acelerações dos centros de massa do veículo e do chassis são as mesmas, bem como a aceleração angular de rolamento é diretamente relacionada às acelerações dos centros de massa. Tais relações são apresentadas na equação 4.8.

$$a_{carga} = a_{roda} = \ddot{\psi} \cdot r_{roda} \quad (4.8)$$

Ao se aplicar às equações 4.5, 4.6 e 4.7 a restrição apresentada na equação 4.8 e o modelo elástico para a força de contato mostrado na equação 4.4, obtém-se o modelo do veículo apresentado nas equações 4.9 e 4.10.

$$(J_{roda} + M_{roda} \cdot r_{roda}^2) = T_e - T_b - F_c \cdot r_{roda} \quad (4.9)$$

$$F_c = K_{contato} \cdot (x_{carga} - x_{roda} - \Delta x_{repouso}) + F_h - F_{gravidade,carga} - F_{A1} = M_{carga} \cdot a_{carga} \quad (4.10)$$

As expressões apresentadas nas equações 4.9 e 4.10 configuram o diagrama de blocos apresentado na Figura 4.5.

Para destacar a dinâmica do chassis/carga útil, o diagrama de blocos da Figura 4.5 pode ser redesenhado da maneira apresentada na Figura 4.6.

O sistema destacado em linha pontilhada no diagrama de blocos da Figura 4.6, o qual representa a dinâmica de translação do chassis e carga útil do Vecarr, possui a função de transferência apresentada na equação 4.11.

$$Carga(s) = \frac{K_{contato}}{1 + \frac{K_{contato}}{M_{carga} \cdot s^2}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{contato}} + \frac{1}{M_{carga} \cdot s^2}} \quad (4.11)$$

Como a constante elástica de deformação no contato entre o rolamento e o mancal possui um valor muito elevado, a equação 4.11 pode ser simplificada ao formato apresentado na equação 4.12, o que permite redesenhar o diagrama de blocos do sistema de rotação da roda, mostrado na Figura 4.5, através do diagrama de blocos apresentado na Figura 4.7.

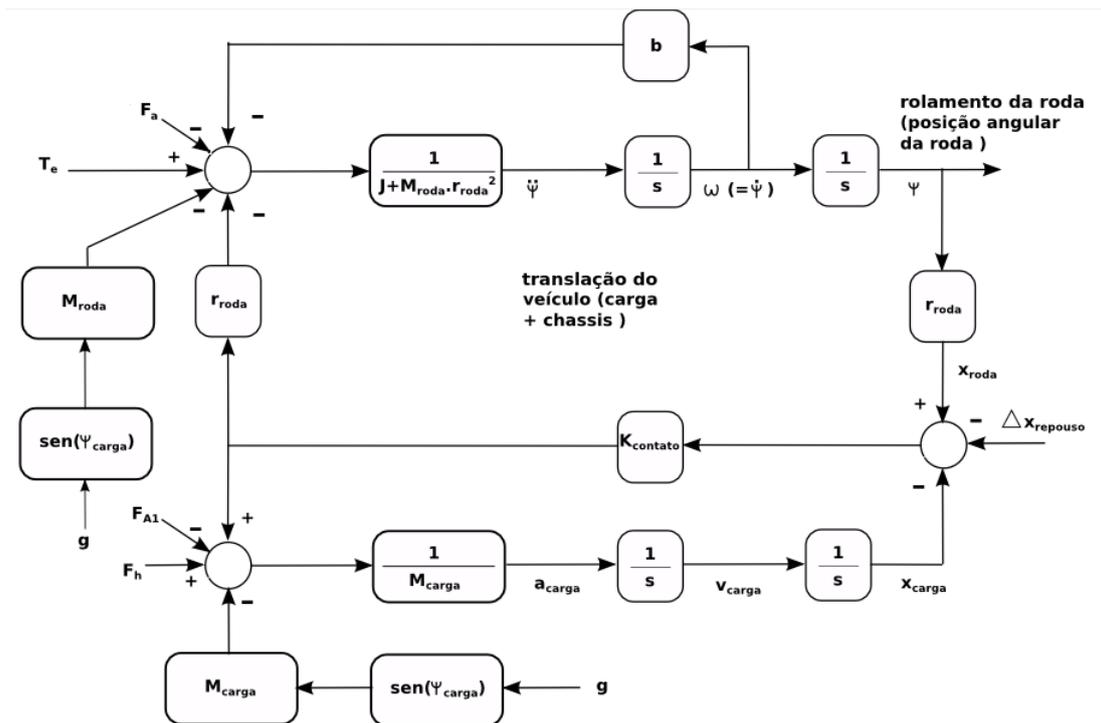


Figura 4.5: Diagrama de blocos do modelo de impedâncias do eixo de tração/rodas e do chassis/carga útil.

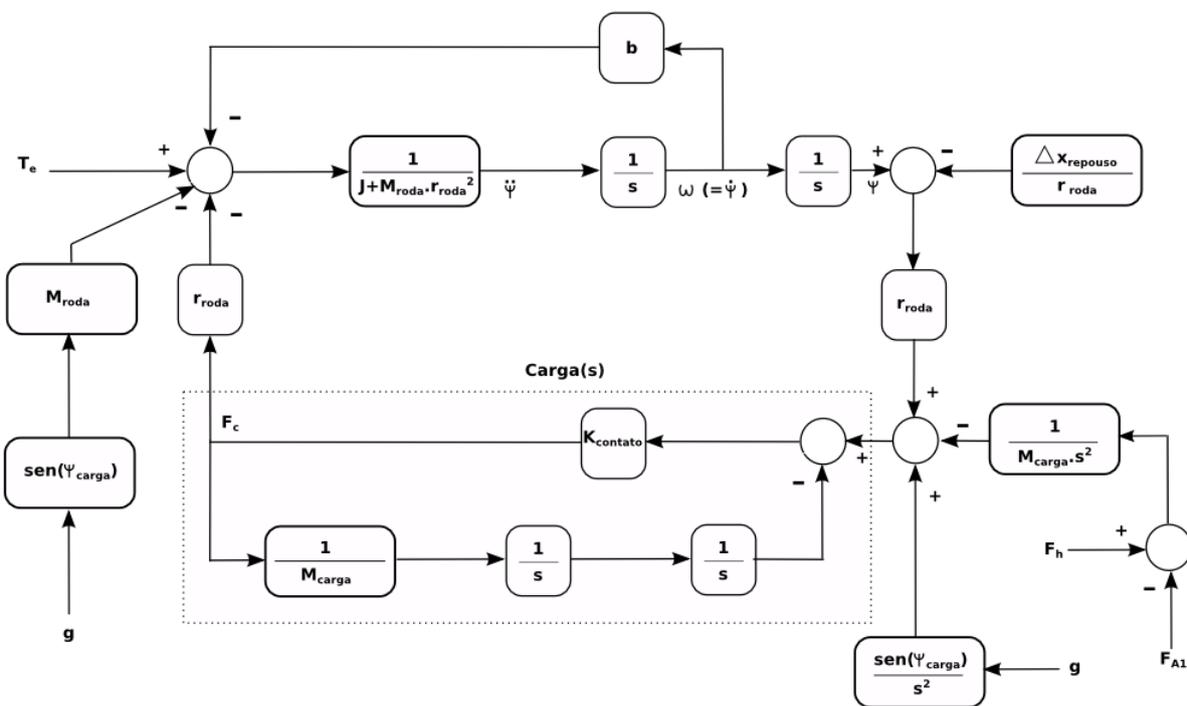


Figura 4.6: Diagrama de blocos do modelo de impedâncias do eixo de tração/rodas e do chassis/carga útil destacando a dinâmica do chassis/carga útil.

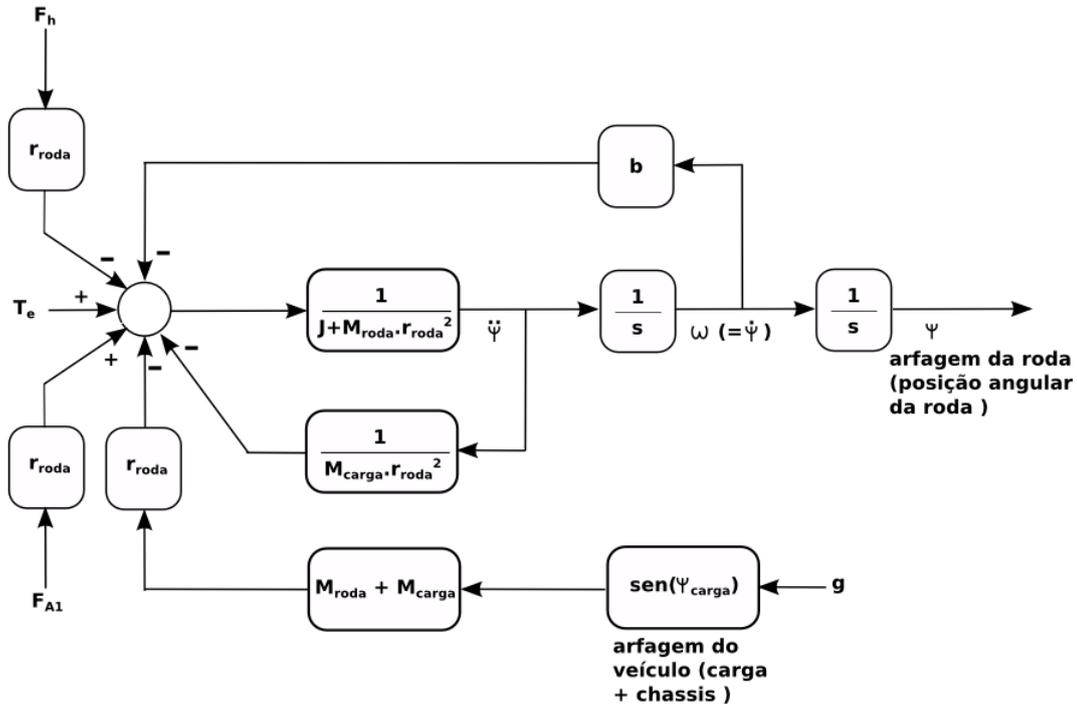


Figura 4.7: Diagrama de blocos do modelo de impedâncias do eixo de tração/rodas e do chassis/carga útil, obtido considerando-se o alto valor da constante elástica de contato entre esses corpos.

$$Carga(s) = M_{carga} \cdot s^2 \tag{4.12}$$

O diagrama de blocos do sistema apresentado na Figura 4.7 caracteriza a função de transferência apresentada na equação 4.13.

$$\frac{\omega(s)}{T_e(s)} = \frac{\dot{\psi}(s)}{T_e(s)} = \frac{\frac{1}{b}}{s \cdot \frac{J + (M_{carga} + M_{roda}^2) \cdot r_{roda}}{b}} + 1 \tag{4.13}$$

Os parâmetros do modelo simplificado do Vecarr, mostrado na equação 4.13, demandam a caracterização do momento de inércia para o movimento de rolamento da roda - J - , da massa total do veículo - $M_{carga} + M_{roda}$ - , do raio da roda - r_{roda} - e do coeficiente de atrito viscoso - b.

Os parâmetros diretamente mensuráveis são apresentados na Tabela 4.1. A massa do veículo irá variar durante a operação do sistema e, como não está contemplada uma medição em tempo real dessa massa, tal parâmetro será unicamente estimado pela massa à vazio do veículo. O momentos de inércia dos corpos que rotacionam nos movimentos de rolamento da roda e de guinagem do veículo são demasiadamente complexos para cálculo algébrico e, portanto, tais momentos foram obtidos por cálculo numérico em plataforma Solid Works. Para essa avaliação,

Tabela 4.1: Tabela contendo os parâmetros de impedância mecânica para o Vecarr. Os parâmetros foram obtidos por medição, catálogos e modelagem em Solid Works.

Parâmetro	Valor	Observações
$M_{roda} + M_{veiculo,vazio}$	42,9 kg	-
r_{roda}	0,12 m	-
$J_{poliaMaior,polia}$	0,012 kg.m ²	referido ao eixo da polia maior
$J_{poliaMaior,roda}$	0,711 kg.m ²	referido ao eixo da roda
$J_{poliaMenor,polia}$	0,00055 kg.m ²	referido ao eixo da polia menor
$J_{poliaMenor,roda}$	0,301 kg.m ²	referido ao eixo da roda
$J_{motor,motor}$	0,0079 kg.m ²	referido ao eixo do motor
$J_{motor,roda}$	4,33 kg.m ²	referido ao eixo da roda
$J_{total,roda}$	5,34 kg.m ²	referido ao eixo da roda
$J_{total,motor}$	0,0097 kg.m ²	referido ao eixo do motor
J_{θ} (guinagem)	0,578 kg.m ²	referido ao centro de massa

foram tomadas as medidas geométricas - comprimento, largura e espessura - de todas as partes do veículo, bem como suas respectivas orientações e as densidades de cada material. Procedeu-se então ao desenho e parametrização de tais partes na plataforma computacional. Algumas vistas do modelo desenvolvido são apresentadas nas figuras 4.8, 4.9 e 4.10. O programa então calcula, de acordo com o sistema referencial escolhido, os momentos de inércia dos corpos de interesse. Pela abordagem de Euler-Lagrange, a qual dá origem ao modelo em forma canônica ou modelo de impedâncias aplicado nessa tese, os momentos de inércia são avaliados para as partes que rotacionam em torno dos eixos que caracterizam cada atitude de rotação, ou seja, arfagem, guinagem e rolamento. Assim sendo, foram caracterizadas as partes rotativas associadas ao movimento de rolamento da roda e motor, bem como ao movimento de guinagem do veículo. Os momentos de inércia obtidos para tais movimentos são apresentados na Tabela 4.1. Como as simulações e análises no estudo da tese são feitos no eixo da roda ou do motor, cada momento de inércia apresentado na Tabela foi referido a ambos eixos, considerando-se para isso a relação de transmissão de 1/3 da polia menor para a polia maior, a relação de 1/7,7 da polia maior para o eixo da roda e a relação total de 1/23,4 do eixo da roda para o eixo do motor.

Os conjugados de atrito viscoso e Coulombiano foram determinados por experimentos realizados no veículo já montado. Inicialmente foi avaliado o conjugado de atrito estático imposto pelo mancal ao eixo de tração. Para tal tarefa, foram realizados dois ensaios, cujos resultados foram confrontados. No primeiro ensaio, o veículo foi colocado sobre uma mesa e, no pneu conectado ao eixo de tração, foi presa uma das extremidades de um cabo de cobre. Na outra extremidade do cabo foram alocados, gradualmente, alteres com massa calibrada, até que o



Figura 4.8: Vista do Vecarr modelado em SolidWorks.



Figura 4.9: Vista do Vecarr modelado em SolidWorks.



Figura 4.10: Vista do Vecarr modelado em Solid Works.

veículo começasse a se mover. Tal experimento é ilustrado na Figura 4.11.

Para o experimento mostrado na Figura 4.11, observou-se que o veículo começa a se mover com uma massa de 9,0kg. Como o raio do pneu é de 0,12m, o conjugado de atrito estático será dado pela expressão apresentada na equação 4.14.

$$T_{estatico} = M_{alteres} \cdot g \cdot r_{roda} = 10,54N.m \quad (4.14)$$

Como o conjugado de atrito estático avaliado na equação 4.14 é obtido no eixo de saída da redutora e a relação de redução é de 23,4, tal conjugado possui 0,46N.m quando referido ao eixo do motor, ou seja, 7,5% do seu conjugado nominal.

Tal experimento foi repetido através do *software* de controle do inversor de frequência do acionamento. Nesse cenário, o inversor foi habilitado para operar com controle de conjugado e a referência desse conjugado foi aumentada gradualmente, até que o veículo começasse a andar. A resolução de ajuste é de 0,1N.m e foi constatado um conjugado igual a 8,0% do conjugado nominal. Esse valor é 6,7% maior que aquele obtido no experimento envolvendo alteres e, considerando os erros na estimativa de conjugado do inversor, os resultados possuem boa aproximação e portanto serão utilizados no modelo do Vecarr. Como esse conjugado tem natureza Coulombiana, interpreta-se que quaisquer conjugados de acionamento menores que

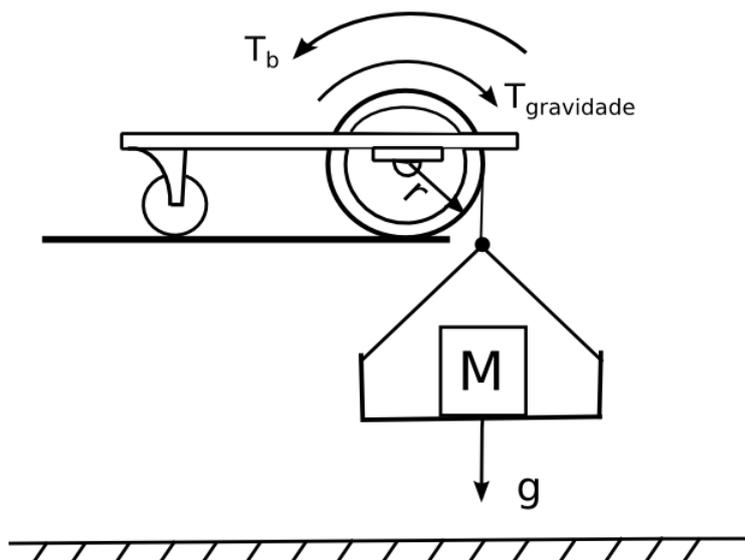


Figura 4.11: Ilustração do experimento realizado para levantamento do conjugado de atrito estático do Vecarr.

8% não levarão o veículo a sair do estado de repouso. Além disso, interpreta-se também que quando o usuário demandar movimento do Vecarr, essa parcela de conjugado estático pode ser diretamente compensada por comandos em avanço da estrutura de controle.

Para modelar o atrito viscoso e Coulombiano com o veículo em movimento, o mesmo foi colocado em superfície plana, sem carga, sendo o acionamento configurado para operação com controle de velocidade. Então, para diversas velocidades de acionamento, foram registrados os respectivos conjugados eletromagnéticos medidos pelo *software* de controle do conversor. Como a única carga era o atrito viscoso e Coulombiano de mancal e o veículo se deslocou a velocidade constante, conclui-se que os conjugados eletromagnéticos registrados são iguais aos respectivos conjugados de mancal. Os resultados obtidos em tal experimento são apresentados na Tabela 4.2.

Os dados mostrados na Tabela 4.2 mostram que o conjugado de mancal possui uma relação não-linear com a velocidade e seu valor satura a partir de 700rpm. Destaca-se também que os valores apresentados nessa Tabela podem ser interpolados e utilizados nas estruturas de controle para a aplicação de comandos em avanço destinados à compensação do atrito de mancal.

Conclui-se então a caracterização do modelo de impedâncias ou modelo em forma canônica do Vecarr para o movimento de rotação do eixo de tração. Nesse modelo o efeito de translação da massa do chassi e da carga útil foi referido ao eixo de rotação, bem como se caracterizou o atrito viscoso e Coulombiano de mancal. Como o Vecarr possuirá alocação dinâmica de massa e o sistema não possuirá medição em tempo real dessa grandeza, os comandos do sistema de controle que demandarem estimativa de massa utilizarão a massa do veículo à vazio. Nas demais

Tabela 4.2: Tabela contendo o conjugado de atrito no mancal do Vecarr em função da velocidade.

Velocidade[rpm]	Conjugado de atrito no mancal [N.m]	Conjugado de atrito no mancal [%]
1	0,77	12,5
100	0,92	15
300	1,04	17
500	1,10	18
700	1,23	20
900	1,23	20
1100	1,23	20
1300	1,23	20
1100	1,23	20
1500	1,23	20
1700	1,23	20
1800	1,23	20

seções, todas as estratégias de controle propostas utilizarão informações do modelo do veículo incorporadas à estrutura do controlador, tal como proposto na estrutura de torque computado apresentada por Pereira e Torres [63], e nos trabalhos de BenLamine *et al* [9], Kosuge *et al* [48] e Cao *et al* [16].

4.2 1^a Proposta de Controle: ajuste do sistema para estabelecimento da impedância mecânica equivalente com o objetivo de melhoria da sensação de contato na cooperação homem-robô

Como apresentado por Kazerooni [45], os sistemas que demandam a cooperação homem-robô podem ser modelados por uma associação massa-mola-amortecedor equivalente, cujos parâmetros caracterizam a impedância mecânica do sistema. Quando tal robô é incorporado à uma estrutura de realimentação de estados, o sistema como um todo passa a se comportar como sendo uma associação massa-mola-amortecedor equivalente, cujos parâmetros que governam o comportamento dinâmico são controlados pelos ganhos dos compensadores. Dentro dessa concepção, quando houver a cooperação homem-robô, a força percebida na mão humana é igual àquela que seria provocada em um sistema massa-mola-amortecedor, onde a massa pudesse se deslocar em um plano de inclinação nula e sem atrito, tal como mostrado na Figura 4.12.

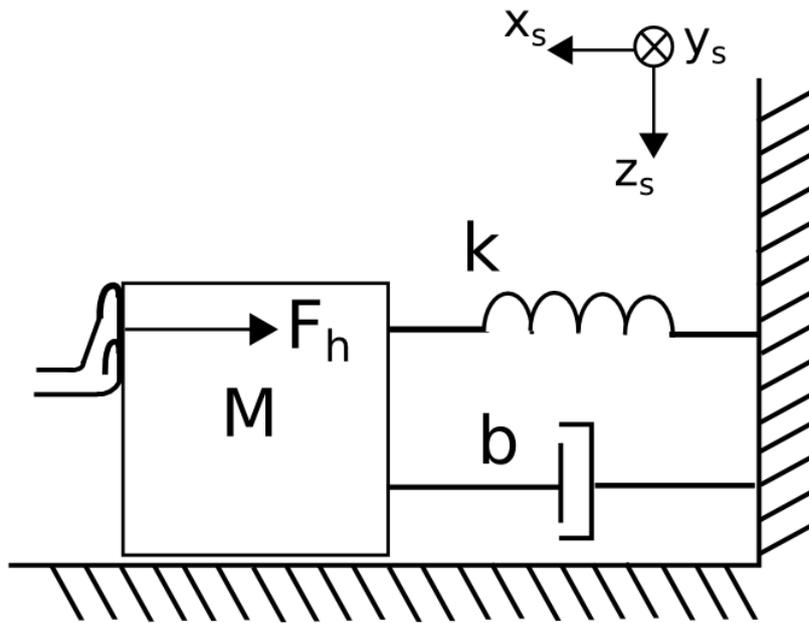


Figura 4.12: Sistema massa-mola-amortecedor genérico e que pode representar a dinâmica de corpos no espaço.

Considerando o controle da impedância mecânica, é possível controlar as sensações percebidas pelas pessoas que tocam o robô para desempenhar a tarefa de cooperação. Se, por exemplo, a massa equivalente for elevada, haverá pouca aceleração mediante a um sinal de força na forma de impulso aplicado por uma pessoa. Nesse cenário, a pessoa possui a sensação de interagir com um corpo “pesado”. Se a constante de amortecimento viscoso for elevada, por exemplo, a pessoa terá dificuldade de impôr uma velocidade alta ao robô, transmitindo a sensação de um sistema “lento”. Se, por outro lado, o sistema possuir uma constante de mola elevada, a pessoa necessitará impôr uma força crescente ao veículo quando houver aumento da sua posição com relação àquela de repouso. Nesse cenário, há a percepção de um sistema “duro”, o qual produzirá uma sensação de susto caso o veículo seja deslocado da posição de repouso, uma vez que o seu retorno à tal posição se dará com grande aceleração e a mesma vai se manter até que o veículo se aproxime do seu referencial inercial.

Baseado nas diferentes percepções humanas em função da impedância mecânica do sistema, Ben-Lamine e Shimizu [9] apresentaram um estudo onde pessoas foram convidadas a tocar um braço mecânico com um grau de liberdade de translação e cuja impedância mecânica equivalente fosse controlada por um acionamento elétrico. Após aplicarem impulsos de força ou sinais com duração mais extensa, os participantes da pesquisa avaliaram a sua sensação com relação à cooperação com o robô. A avaliação dessa sensação se deu sob quatro pares de adjetivos, os quais são listados a seguir:

- tranquilizante x tenso: esse par de adjetivos avalia o grau de tranquilidade mental que a pessoa sentiu durante a cooperação com o robô;
- flexível x duro: avalia se a pessoa sentiu tocar algo macio, independente do material que constitui o braço mecânico;
- agradável x desagradável: avalia se a pessoa não sente trepidações ou solavancos do braço mecânico;
- respostas humanas x respostas de máquina : avalia se a pessoa sentiu do braço mecânico uma resposta similar àquela que seria desenvolvida por um braço humano. Quanto mais próximo a uma resposta humana, mais amigável se torna a percepção do sistema mecânico, uma vez que o cérebro e sistema muscular do condutor possuem dinâmica compatível com a do robô.

Para cada configuração de impedância mecânica equivalente do braço robótico, cada um dos quatro pares de parâmetros listados recebeu uma nota do participante que tocou o sistema. Foram escolhidas 48 combinações de impedâncias mecânicas e, dentro delas, observou-se que em 24 combinações a média das notas caracterizou que o sistema mecânico era simultaneamente tranquilizante, flexível, agradável e com resposta similar à humana. Tais combinações são apresentadas na Tabela 4.3.

No contexto do Vecarr, o sistema robótico é pensado para cooperação com o homem por longos intervalos de tempo. Como mostrado no capítulo 3, algumas jornadas de catadores de papel chegam a durar 4 horas. Assim sendo, é legítimo e interessante se considerar que a cooperação homem-robô não seja somente para multiplicação de força, mas também seja uma cooperação onde a percepção humana de contato seja de boa qualidade. Nessa tese, a “qualidade” da cooperação homem-robô será avaliada pelos critérios apresentados anteriormente, ou seja, se a pessoa percebe, no contato com o Vecarr, uma sensação tranquilizante, de algo flexível, agradável e com resposta similar à humana. A malha de controle que irá garantir tais características ao contato humano será apresentada na próxima seção.

4.2.1 Desenvolvimento da estrutura de controle para emulação de impedância mecânica amigável ao ser humano

Para então garantir uma cooperação de qualidade para o sistema homem-Vecarr, será sintetizada uma malha de controle que garanta ao Vecarr a resposta dinâmica do sistema massa-mola-amortecedor equivalente apresentado na linha 1 da Tabela 4.3. Inicialmente, considera-se

Tabela 4.3: Tabela contendo as diferentes impedâncias mecânicas equivalentes para as quais os participantes da pesquisa de Ben-Lamine *et al* [9] julgaram que o sistema mecânico é simultaneamente tranquilizante, flexível, agradável e com respostas típicas de humanos.

Combinação	Massa - M_{eq} [kg]	Constante de amortecimento - b_{eq} [N/(m/s)]	Constante de mola - k_{eq} [N/m]
1	3	50	30
2	3	50	80
3	3	50	130
4	3	120	30
5	3	120	80
6	3	120	130
7	3	200	30
8	3	200	80
9	3	200	130
10	8	20	30
11	8	20	80
12	8	20	130
13	8	50	30
14	8	50	80
15	8	50	130
16	13	20	30
17	13	20	80
18	13	20	130
19	13	50	30
20	13	50	80
21	13	50	130
22	20	20	30
23	20	20	80
24	20	20	130

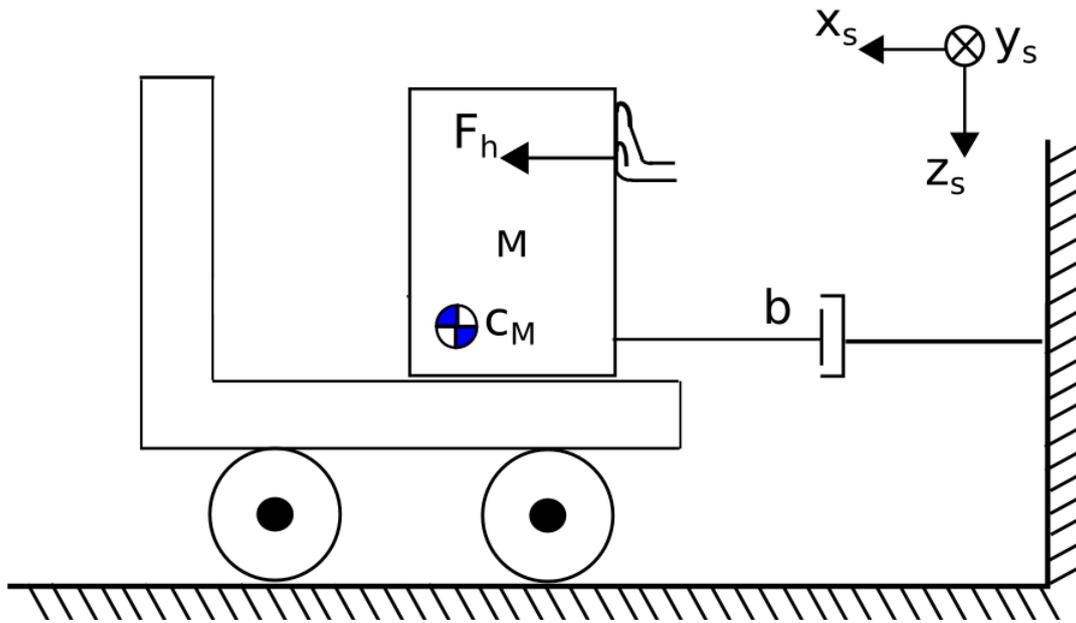


Figura 4.13: Impedância mecânica equivalente percebida pelo condutor durante a cooperação com o Vecarr.

a necessidade de uma adaptação: a mola equivalente apresentada na pesquisa de Ben-Lamine e Shimizu [9] possui uma de suas extremidades fixa a um referencial inercial. Se o sistema de controle do Vecarr emular tal característica, o veículo precisará de força crescente para se deslocar do ponto de repouso inicial, uma vez que a mola equivalente estaria aumentando sua deformação e conseqüentemente a força contrária ao movimento. Para solucionar tal inconveniência, a impedância mecânica emulada pelo Vecarr terá coeficiente elástico nulo. Tal suposição é suportada pelo trabalho publicado por Duchaine *et al* [25], o qual mostra que o efeito elástico da mola equivalente é desprezível para a qualidade da percepção humana em sistemas de cooperação com robôs. O sistema equivalente é ilustrado na Figura 4.13.

Para que o sistema de controle garanta que o Vecarr se comporte como a impedância mecânica mostrada na Figura 4.13, é necessário medir a força imposta pelo usuário e controlar a dinâmica do sistema para que ela seja idêntica àquela apreciada na Figura referida.

Para a medição de força, será aplicada a mesma ideia desenvolvida no exoesqueleto desenvolvido no laboratório de Biomecatrônica do MIT e apresentado por Walsh [82]. Nesse trabalho, o exoesqueleto é sobreposto à perna humana e um motor elétrico presente no quadril controla o movimento da perna através da compressão medida em um sensor posicionado entre a coxa e a estrutura do atuador. Cao [16] apresenta a mesma ideia para um exoesqueleto também aplicável à perna humana, porém o sensoriamento mede a força em uma barra instalada entre a coxa e a canela do indivíduo. Nos dois cenários listados, o exoesqueleto trabalha com o intuito de aumentar a capacidade de translação de carga do indivíduo, tal como ocorre

no Vecarr. Além disso, os sensores operam captando compressão e tração em uma orientação conveniente. Seguindo essa ideia, o Vecarr apresentará um sensor de força do tipo célula de carga instalado entre o veículo e uma barra de contato com o usuário, e a mesma irá medir a força que o usuário aplica no sentido de translação do veículo.

Para garantir que o Vecarr emule o comportamento mecânico de um sistema massa-mola-amortecedor de referência, deverão ser observadas no veículo as mesmas trajetórias mecânicas desenvolvidas no sistema de referência quando ambos receberem a mesma força F_h do usuário. Uma possível maneira para se implementar tal comportamento é utilizar a força do usuário medida pela célula de carga - F_h - e aplicá-la a um sistema dinâmico virtual de 2ª ordem com a impedância equivalente desejada. Tal sistema calculará quais deveriam ser a aceleração, velocidade e posição do Vecarr para que o mesmo seja percebido como sendo um corpo com a impedância desejada. Tal comportamento pode ser obtido através de uma unidade de geração de referência das trajetórias mecânicas, a qual calcule a aceleração, velocidade e deslocamento que o Vecarr precise desenvolver à partir das trajetórias mecânicas do sistema com a impedância mecânica desejada. Como as variáveis de trajetória mecânica – aceleração, velocidade e posição – são dinamicamente acopladas, se o Vecarr for regulado tendo uma dessas três variáveis como referência de sua malha de controle, automaticamente as outras duas variáveis estarão reguladas e, assim, o veículo vai se deslocar como sendo o sistema massa-mola-amortecedor desejado. Sob essas considerações e tendo em vista que aceleração do veículo não está sendo medida, o sistema de controle não terá sua malha fechada através da aceleração. O deslocamento avaliado será de uma mola virtual embarcada no veículo, o que também impossibilita o fechamento da malha de controle por posição. Como há encoder instalado no veículo e não há outro impedimento de ordem técnica, o fechamento da malha de controle se dará pelo sinal de velocidade.

Assim sendo, o sistema de controle será constituído por uma unidade de geração de referências e uma malha para controle de velocidade. Tal sistema será sintetizado pela estrutura apresentada na Figura 4.14.

Tal como mostrado na Figura 4.14, o controlador irá incorporar um comando de conjugado em avanço para compensação das realimentações internas dos atritos viscosos e Coulombiano, cujos níveis de conjugado são apresentados na seção de modelagem do veículo, Tabela 4.2. Essa opção garante que o comando de conjugado de realimentação seja responsável somente pela rejeição de cargas externas e rastreamento de trajetória, tal como apresentado por Cardoso [17].

A correta operação do sistema depende da sintonia do compensador PI - $k_{p\omega}$ e $k_{i\omega}$ - apre-

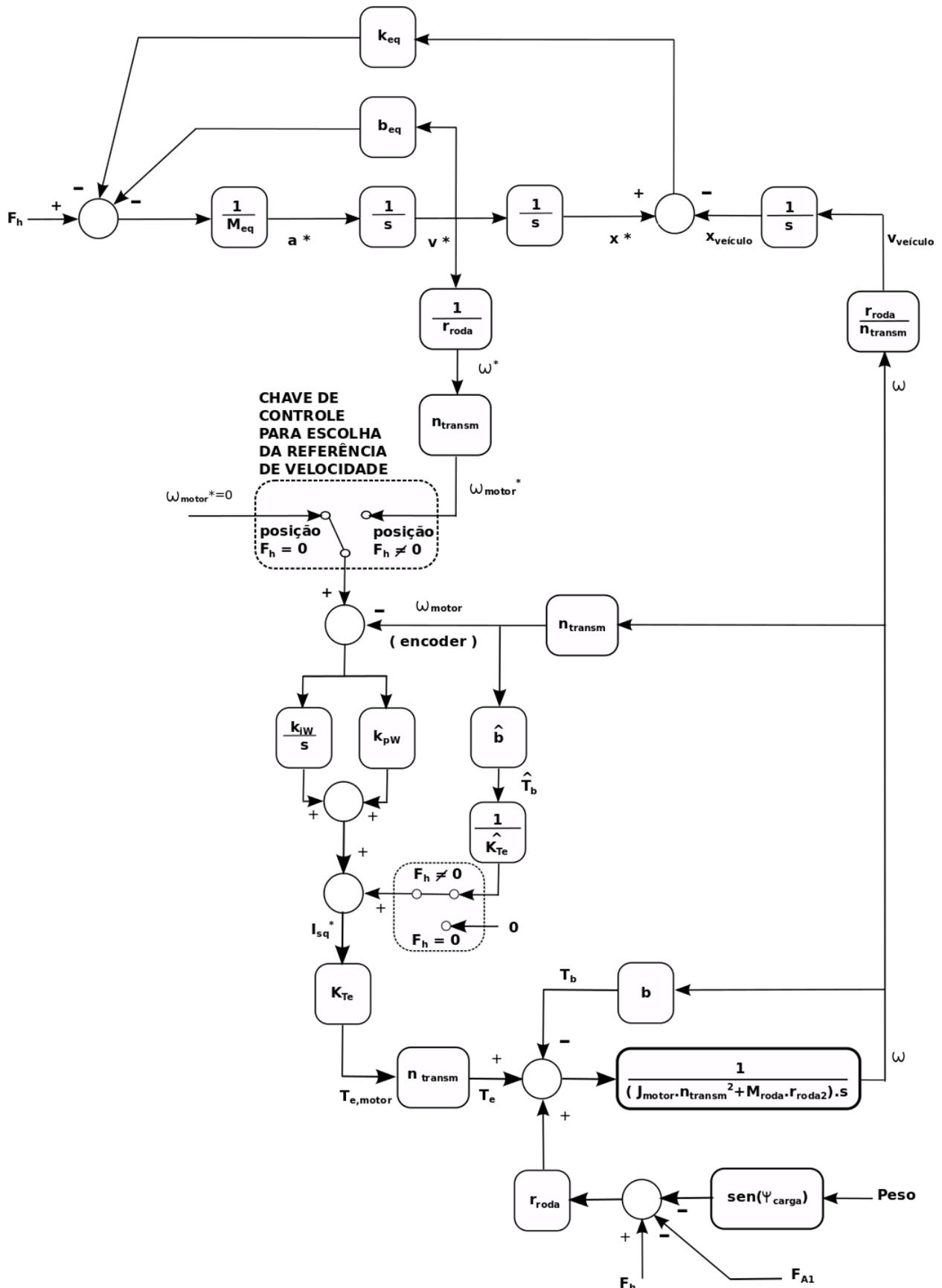


Figura 4.14: Controlador proposto para que o Vecarr emule um sistema massa-mola-amortecedor com impedância mecânica equivalente caracterizada pelos parâmetros “ M_{eq} ”, “ b_{eq} ” e “ k_{eq} ”.

sentado na malha de controle. A metodologia para ajuste de tais ganhos é apresentada na próxima seção.

4.2.2 Ajuste dos ganhos da malha de controle para operação do Vecarr emulando impedância mecânica amigável ao ser humano

Para ilustrar a metodologia de ajuste de ganhos, será tomada como exemplo a configuração do Vecarr para emular a impedância mecânica da primeira linha da Tabela 4.3. Destaca-se que a metodologia é extensível a qualquer outra impedância mecânica que se deseja emular.

Inicialmente, observa-se que a impedância mecânica de referência é caracterizada pela função de transferência apresentada na equação 4.15.

$$\frac{v^*(s)}{F_h(s)} = \frac{1}{M_{eq} \cdot s + b_{eq} + k_{eq} \cdot \left(\frac{1}{s} - \frac{G_\omega(s)}{s} \right)} \quad (4.15)$$

Para a impedância $M = 3\text{kg}$, $b = 50\text{N}/(\text{m/s})$ e $k = 30\text{N/m}$, os pólos da função de transferência mostrados na equação 4.15 estão alocados em $-2,6$ e $-0,1\text{Hz}$. Destaca-se que o pólo de maior valor absoluto possui dinâmica com a mesma ordem de grandeza observada no experimento desenvolvido nessa tese de doutorado para caracterização do sinal de força desenvolvido por pessoas com intenção de deslocar o veículo. Além disso, tais pólos permitem modelar o sistema mecânico através de dois sistemas de 1ª ordem sobrepostos, cujas bandas passantes são iguais aos valores dos pólos. Assim sendo, como pessoas impõem sinais da ordem de $3,5\text{Hz}$ e a impedância mecânica que se deseja emular possui a resposta dinâmica mais rápida com banda passante de $2,6\text{Hz}$, existirão componentes espectrais da ordem de $2,6\text{Hz}$ no comando de referência de velocidade que será aplicado ao veículo. Assim sendo, a malha para controle de velocidade deverá responder à comandos de referência com $2,6\text{Hz}$ de banda passante. Para garantir tal rastreamento de trajetória, será alocada uma banda passante de 26Hz para a malha de velocidade.

Para correlacionar os ganhos dos compensadores com a banda passante desejada para a malha de controle, apresenta-se na equação 4.16 a função de transferência do comando de velocidade para a velocidade real no eixo da roda.

$$\frac{\omega(s)}{\omega^*(s)} = \frac{k_2 \cdot (k_{p\omega} + \frac{k_{i\omega}}{s})}{(J_{motor} \cdot n_{transm}^2 + M \cdot r_{roda}^2) \cdot s + k_2 \cdot k_{p\omega} + k_2 \cdot \frac{k_{i\omega}}{s}} \quad (4.16)$$

$$\text{onde : } k_2 = k_{Te} \cdot n_{transm}^2 \quad (4.17)$$

Como mostrado na equação 4.16, haverá variação na posição dos pólos quando se variar a carga embarcada no veículo. Para garantir que tal variação não afete significativamente o comportamento dinâmico do sistema, o projeto do sistema de controle será feito sob a premissa de robustez dinâmica, ou seja, os pólos serão separados de uma década no domínio da frequência. Nessa abordagem, para as frequências próximas ao pólo de maior valor absoluto, o polinômio característico da função mostrada na equação 4.16 pode ser aproximado à função apresentada na equação 4.18.

$$(J_{motor} \cdot n_{transm}^2 + M \cdot r_{roda}^2) \cdot s + k_2 \cdot k_{p\omega} = 0 \quad (4.18)$$

$$\Rightarrow k_{p\omega} = \frac{(J_{motor} \cdot n_{transm}^2 + M \cdot r_{roda}^2) \cdot s_{polo1}}{k_2} \quad (4.19)$$

O pólo de maior valor absoluto, utilizado na equação 4.18, é alocado na região de frequências mais altas. Nessa região, o conjugado de referência sintetizado pelo controlador será predominantemente composto pela contribuição do compensador proporcional presente no PI da malha de velocidade. Tal compensador atua sobre o erro de velocidade, o qual possuirá dinâmica compatível com a referência de velocidade, bem como terá dinâmica compatível com o distúrbio de carga aplicada ao eixo do motor. Como o comando de velocidade possuirá banda passante mais alta que aquela do distúrbio, os comandos de conjugado do regulador proporcional terão banda passante compatível àquela da referência de velocidade. Como mostrado nessa seção, tal referência possui 2,6Hz de banda passante e, para garantir o rastreamento de tais comandos, o pólo de maior valor absoluto do controlador será alocado a 26Hz. Assim sendo, o ganho proporcional da equação 4.18 pode ser obtido tal como apresentado na equação 4.20. Destaca-se que nessa equação o projeto do compensador foi feito considerando carga útil nominal de 500kg.

$$k_{p\omega} = \frac{(J_{motor} \cdot n_{transm}^2 + M \cdot r_{roda}^2) \cdot s_{polo1}}{k_2} = 4A/(rad/s) \quad (4.20)$$

Tabela 4.4: Tabela contendo os pólos do sistema de controle apresentado na Figura 4.14 para os compensadores sintonizados como sendo $k_{p\omega} = 4 \text{ A}/(\text{rad}/\text{s})$ e $k_{i\omega} = 65 \text{ A}/\text{rad}$.

Massa embarcada [kg]	Pólos
500kg	-23,0 e -2,9 Hz
43kg	-92,3 e -2,7 Hz

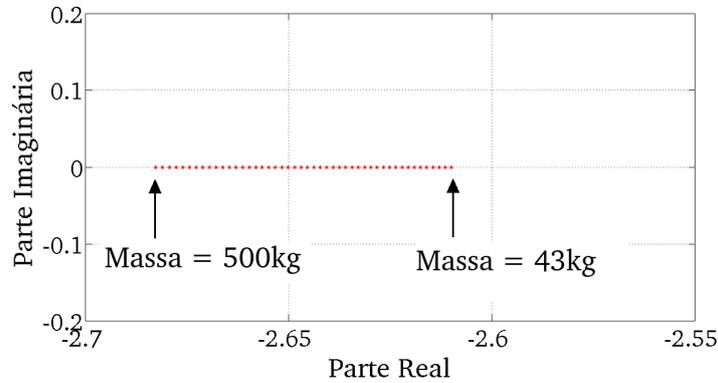


Figura 4.15: Lugar do pólo de menor valor absoluto para massa variando de 43 a 500kg.

Da mesma forma, o compensador integral atua na síntese dos comandos de conjugado de baixa frequência, sendo responsável pela rejeição do erro de integral de velocidade, ou seja, ele atua sobre o erro de posição. Como o sinal de posição possui dinâmica mais lenta que o de velocidade, e a malha de velocidade está configurada com 26Hz de banda passante, a malha de posição será configurada com 2,6Hz de banda passante. Sob a premissa da robustez, o polinômio característico da função mostrada na equação 4.16 pode ser aproximado ao formato apresentado na equação 4.21 para a região de baixas frequências. Nessa aproximação, apresenta-se na mesma equação o cálculo do ganho integral da malha de velocidade.

$$k_2 \cdot k_{p\omega} + k_2 \cdot \frac{k_{i\omega}}{s} = 0 \quad (4.21)$$

$$\Rightarrow k_{i\omega} = -s_{polo2} \cdot k_{p\omega} \quad (4.22)$$

$$\Rightarrow k_{i\omega} = -2 \cdot \pi \cdot 2,6 \text{ Hz} \cdot 4 = 65 \text{ A}/\text{rad} \quad (4.23)$$

Os ganhos dos compensadores apresentados nas equações 4.20 e 4.21 foram obtidos considerando carga nominal de 500kg embarcada no veículo. Como essa carga irá variar e deseja-se que isso não afete significativamente a dinâmica do sistema, os pólos foram recalculados assumindo 43kg de massa. A alocação dos pólos para os limites de massa embarcada são apresentados na Tabela 4.4. O lugar dos dois pólos do sistema de controle completo, representado no plano dos números complexos para a massa variando de 43 a 500kg, são apresentados nas figuras 4.15 e 4.16.

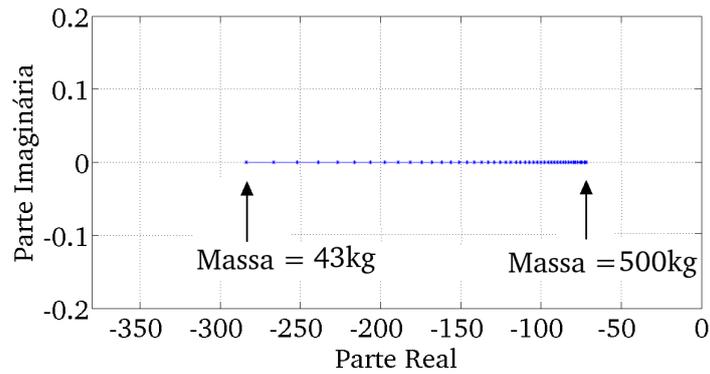


Figura 4.16: Lugar do pólo de maior valor absoluto para massa variando de 43 a 500kg.

Observa-se pela Tabela 4.4 que a redução na massa embarcada de 500 para 43kg alterou em aproximadamente -8% a posição do pólo de menor valor absoluto. Tal variação garante que o rastreamento de posição do veículo não será comprometida quando houver variação da massa embarcada. O pólo de maior valor absoluto teve sua posição variada em aproximadamente +300% quando houve redução da massa embarcada e, como houve aumento de banda passante nessa situação, o rastreamento de velocidade também não será comprometido.

Para avaliar o desempenho do veículo mediante o projeto dos sistemas para regulação e para geração de referências, apresenta-se na próxima seção algumas simulações das soluções desenvolvidas.

4.2.3 Simulação do sistema de controle para operação com emulação da impedância dinâmica mecânica desejada no contato com o usuário

Para avaliar o desempenho do sistema, será inicialmente simulada a imposição de força pelo ser humano que conduz o veículo - F_h - como sendo um sinal em rampa com taxa de subida igual a 10N/s e valor final de 30N. Será considerada uma massa embarcada de 500kg e o veículo movendo-se na subida em um plano com 9° de inclinação.

Aplicando-se tais entradas ao sistema de controle mostrado na Figura 4.14 e sintonizado com os ganhos mostrados nas equações 4.20 e 4.21, obtém-se as formas de onda de força humana, velocidade do veículo, erro de rastreamento de velocidade, forças na mola e no amortecedor virtuais do sistema para geração de referências tais como apresentadas, respectivamente, nas figuras 4.17 a 4.21.

Como mostrado nas figuras 4.17, 4.20 e 4.21, a maior parcela da força imposta por um ser humano ao sistema de geração de referências com dinâmica típica de 3,5Hz é absorvida pelo

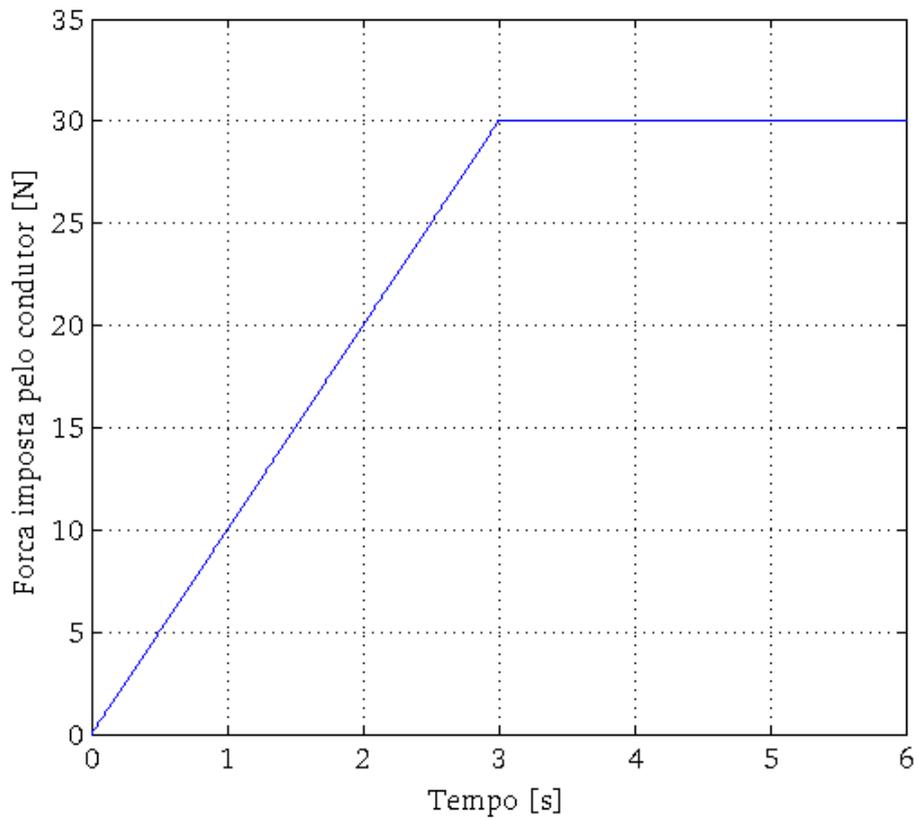


Figura 4.17: Força desenvolvida pelo usuário no contato com o Vecarr.

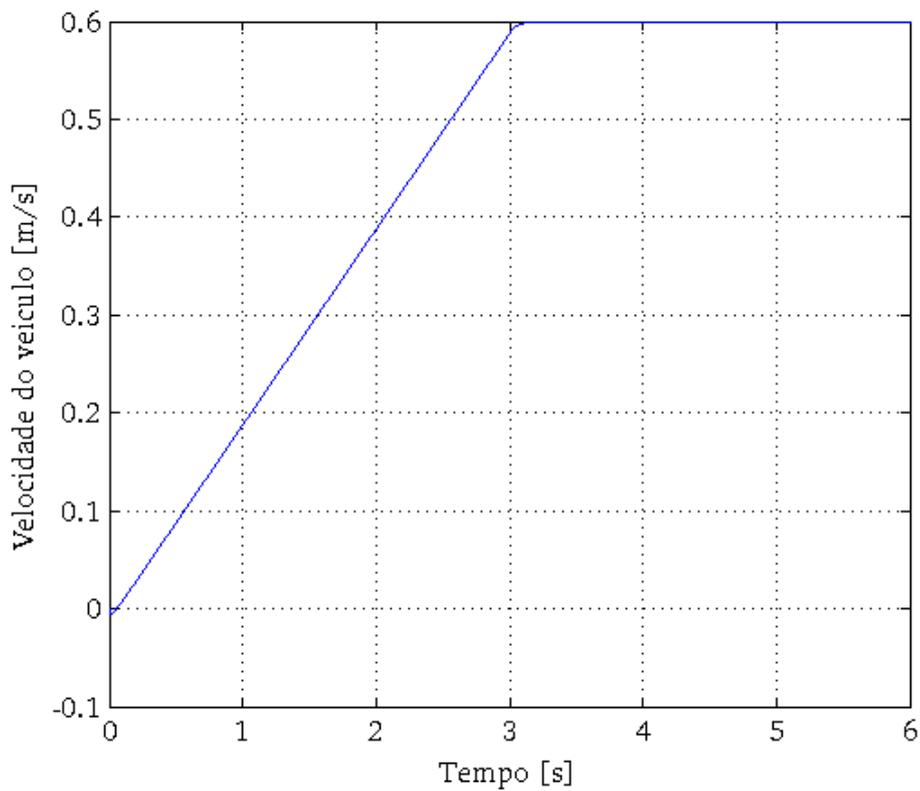


Figura 4.18: Velocidade desenvolvida pelo veículo para operação emulando uma impedância mecânica de referência.

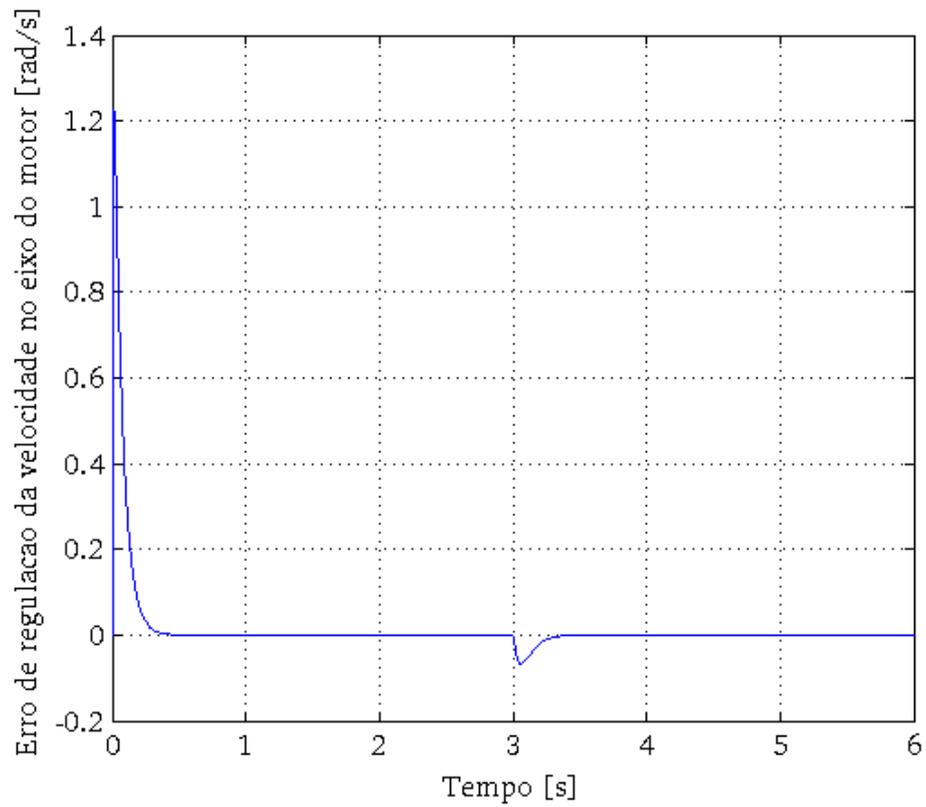


Figura 4.19: Erro no rastreamento de velocidade para operação emulando uma impedância mecânica de referência.

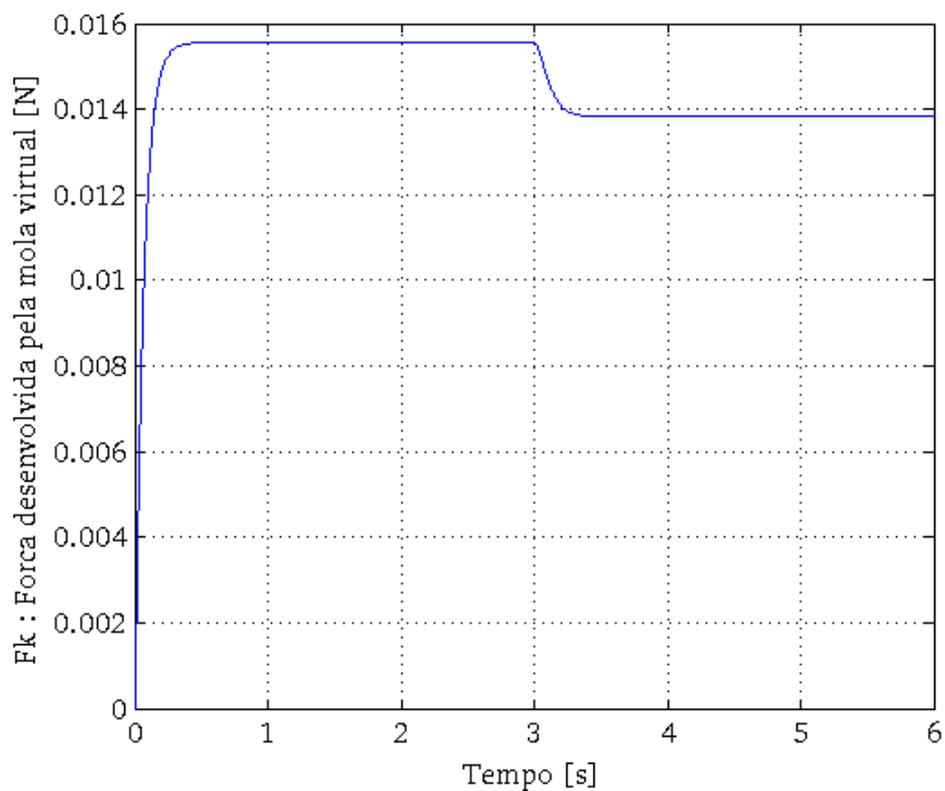


Figura 4.20: Força consumida pela mola virtual do sistema de geração de referências aplicado ao Vecarr operando com emulação de impedância mecânica.

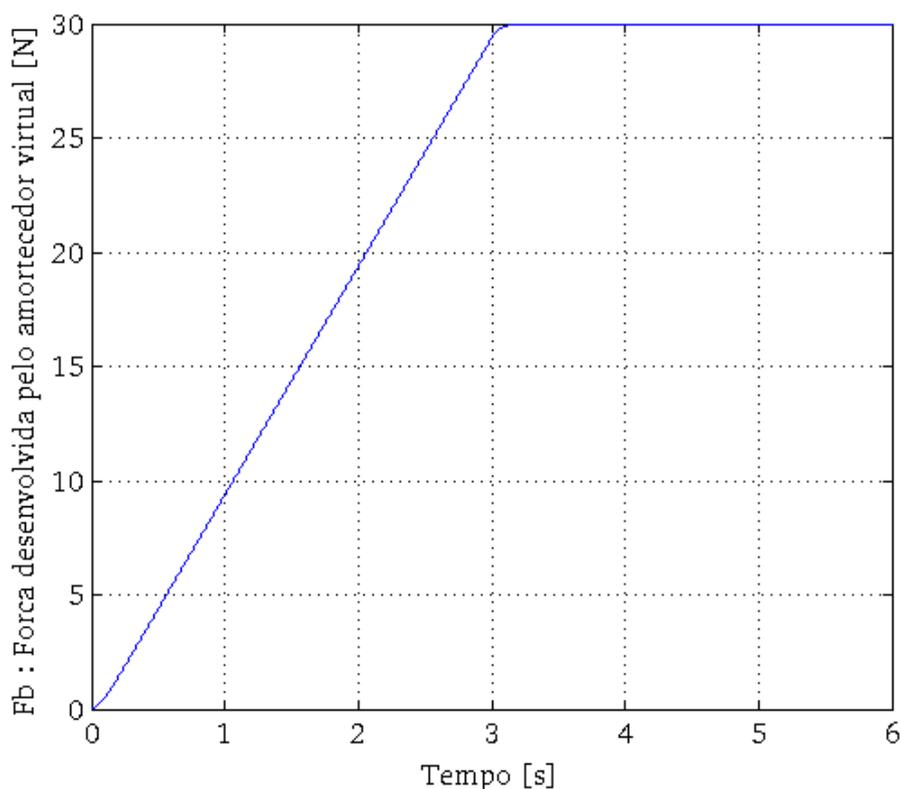


Figura 4.21: Força consumida pelo amortecedor virtual do sistema de geração de referências aplicado ao Vecarr operando com emulação de impedância mecânica.

amortecedor virtual do sistema de geração de referências. Assim sendo, o aumento de velocidade do veículo na dinâmica típica de força imposta por seres humanos demandaria um aumento do valor máximo de força aplicada, uma vez que o amortecedor domina o comportamento dinâmico da impedância mecânica emulada. Tal característica é similar àquela observada em direções elétricas de veículos para evitar capotamentos, e seu modo operante ocorre através do aumento do conjugado resistente no volante para inibir comandos de guinada com alta velocidade angular quando o veículo se desloca com velocidade de translação elevada. No contexto do Vecarr, tal característica poderia ser aproveitada para inibir velocidades perigosas desenvolvidas por crianças ou idosos que o utilizassem para transporte de seus pertences cotidianos. Tal modo de operação também seria adequado no transporte de produtos frágeis em instalações industriais ou comerciais onde, por segurança e rejeição à prejuízos materiais, o veículo inibisse velocidades finais muito elevadas.

O comportamento dinâmico da impedância mecânica de referência foi dominado pelo amortecedor virtual para o exemplo de simulação em questão. Tal comportamento pode ser observado pela resposta em frequência de tal impedância mostrada na Figura 4.22. Observa-se também nos resultados da pesquisa de BenLamine *et al* [9], apresentados na Tabela 4.3, que o contato de boa qualidade é observado para uma extensa faixa de valores de amortecedor, a

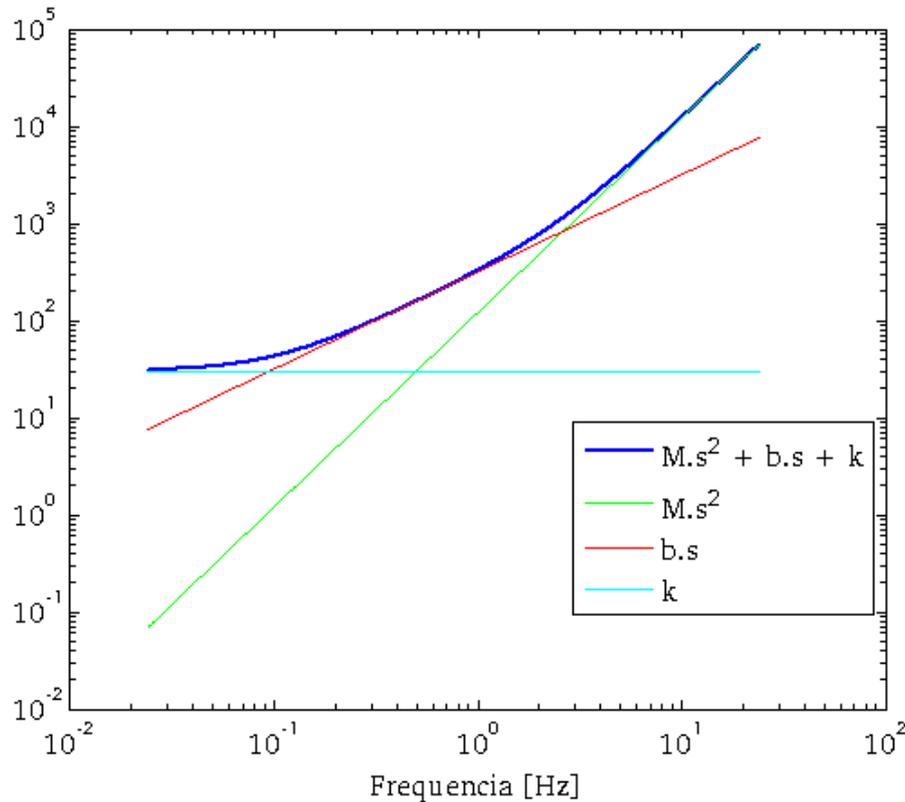


Figura 4.22: Resposta em frequência da impedância mecânica de referência contendo $M = 3[\text{kg}]$, $b = 50[\text{N}/(\text{m}/\text{s})]$ e $k = 30[\text{N}]$.

qual está contida no intervalo $20 < b < 200 \text{ N}/(\text{m}/\text{s})$. Assim sendo, para um dado nível de força, diferentes níveis de velocidade final podem ser configurados para o Vecarr e ainda sim seria preservada a sensação de qualidade ao contato. Além disso, em termos de implementação, acionamentos elétricos baseados à máquina de indução e inversor de frequência, os quais não possuem a mesma qualidade no rastreamento de comandos que aquela apresentada em servoaçionamentos, seriam suficientes para aplicação ao Vecarr nessa situação de busca da qualidade ao contato. Tal argumento se justifica pois, caso ocorram erros de sensoriamento e comando que levem à alterações no valor da constante de amortecimento que se deseja emular, há uma faixa extensa na qual o sistema ainda seria percebido com boa qualidade ao toque humano.

A manutenção de uma boa qualidade de contato é conveniente a algumas aplicações, porém demanda força crescente do usuário para velocidades finais mais elevadas. Em algumas aplicações, o desenvolvimento de velocidades finais elevadas é prioritário frente à qualidade de contato. Visando tais aplicações, apresenta-se na próxima seção uma outra proposta para controle do Vecarr.

4.3 2^a proposta de controle: regulação de esforço constante aplicado pelo condutor

A proposta de controle apresentada na seção anterior demanda, dentre outros ajustes, a configuração de um amortecedor equivalente para o sistema. Nessa abordagem, tem-se a garantia de que o mesmo irá aumentar a sua força contrária ao movimento quando a velocidade do veículo aumentar. Para usuários que precisam se deslocar à baixas velocidades, tais como idosos, crianças, ou para ambientes que exigem deslocamentos suaves, tais como hospitais, supermercados ou almoxarifados de produtos frágeis, a configuração do Vecarr com as características apresentadas na seção anterior são ideais. Porém, outros usuários podem demandar velocidades finais elevadas, tais como catadores de papel que estejam atravessando ruas de elevado tráfego. Nesses cenários o condutor pode se expor a situações potenciais de acidente, e o comportamento do amortecedor equivalente pode inibir uma velocidade final elevada, prejudicando assim a mitigação da situação de risco. Além disso, no caso de catadores de papel e produtores rurais, há um aumento no rendimento financeiro quando mais material é recolhido em menor intervalo de tempo. Alguns desses profissionais tem aptidão física para imprimir velocidades elevadas de deslocamento ao veículo e priorizariam o aumento nos rendimentos financeiros frente ao conforto na cooperação homem-robô. Uma vez que esses ganhos financeiros e o escape de situações de risco estão associados a uma maior velocidade de deslocamento, seria interessante sintetizar uma estrutura de controle que priorizasse o comportamento de uma mola equivalente, a qual multiplique a força medida na célula de carga. Nessa abordagem, o sistema se comportaria análogo a uma fonte de força controlada por força.

Para garantir o comportamento de multiplicação da força, o sistema de controle vai utilizar da deformação impressa à célula de carga pelo usuário e atuar sobre o acionamento elétrico, o qual deslocará o veículo no mesmo sentido dessa deformação. Quando isso ocorrer, a compressão ou tração da célula de carga vai ser alterada, uma vez que a mesma é instalada entre o veículo e a barra de contato com o usuário. Se o usuário imprimir uma deformação com alta dinâmica à célula, o veículo deverá se deslocar também com alta dinâmica ou alta taxa de variação da posição, ou seja, alta velocidade. Como o veículo e a carga embarcada possuem massa muito maior que a barra de contato do usuário, a mola equivalente implementada pelo acionamento deverá possuir elevada rigidez, de tal forma que mínimas deformações na célula de carga produzam forças elevadas para tração do veículo.

Além de se priorizar o efeito de mola equivalente, a estrutura de controle deverá atender a

mais três premissas, as quais são mostradas a seguir:

- Independentemente da carga embarcada, da inclinação da rua e da aceleração desejada para o veículo, o usuário só realizará uma fração da força total necessária;
- A velocidade de deslocamento será imposta pelo usuário;
- Quando o veículo estiver parado, ele deverá permanecer parado, mesmo que seja embarcada ou removida massa da caçamba e exista, portanto, variação do conjugado gravitacional sobre o veículo. O movimento do veículo só poderá ocorrer quando o usuário impôr sua intenção de movimento à barra de comando.

Pela 2^a premissa apresentada, conclui-se que o sistema de controle do veículo não pode conter regulação de velocidade enquanto o usuário desejar movimento pois, nessa situação, não seria possível deixar o usuário impôr a velocidade desejada.

Pela 1^a premissa apresentada, para que o usuário sempre faça uma mesma força independente da força de carga e de aceleração, poderia ser implementada uma estrutura que só multiplique a força da célula de carga na roda ou uma estrutura realimentada que regule a força medida na célula. Se o trajeto e a taxa de embarque de massa fossem previamente conhecidos, seria possível implementar a regulação de força sem controle realimentado, o que, inclusive, dispensaria o uso da célula de carga. Como há variação desses distúrbios para os diversos cenários de uso do veículo, faz-se necessário o uso de uma estrutura realimentada. Se o sistema de controle fosse implementado em malha aberta, ou com uma multiplicação do sinal de força da célula de carga, caso o usuário precise subir um plano inclinado com um dado nível de carga, poderá ocorrer situações onde a força multiplicada seja menor que a da carga, impedindo o veículo de subir a superfície. Nesse mesmo caso, a diferença entre a força multiplicada e a força de carga pode ser tão baixa que a aceleração do veículo também seja muito baixa, situação que incomodaria o usuário. Por outro lado, se esse mesmo sistema de multiplicação de força não realimentado fosse regulado para o pior cenário de carga, ele poderia apresentar acelerações perigosas ao condutor durante deslocamento em superfícies planas e/ou com baixa carga. Assim sendo, a estrutura de controle de força deverá ser realimentada. Além disso, a existência desse controle realimentado de força permite que o usuário imponha a velocidade desejada pois, quando o usuário desejar diferentes acelerações para um mesmo nível de carga, ele irá comprimir a célula de carga com diferentes dinâmicas de força. Nessa situação, o acionamento deslocará o veículo com diferentes acelerações, atingindo portanto diferentes velocidades instantâneas.

Para que a 3^a premissa seja atendida, ou seja, após paradas o veículo permaneça parado mesmo quando há variação de sua massa, sugere-se a implementação de uma malha para regulação de velocidade, a qual receba referência de velocidade nula. Nessa situação, o acionamento impõe o conjugado que se precisar para garantir que o veículo permaneça parado, fazendo a rejeição da carga com a dinâmica necessária. Por essa análise, sugere-se que as 3 premissas são atendidas por duas malhas distintas – uma para controle de força e outra para controle de velocidade. Para ambas as malhas de controle, há a necessidade de regulação do conjugado no eixo do motor, sendo tal regulação já disponibilizada pelo inversor de frequência. Pelo alto custo de se medir diretamente o conjugado, tal grandeza é regulada pela componente i_{sq} do vetor espacial da corrente de estator. Assim sendo, o sistema de controle terá as malhas de controle de força e velocidade implementadas pelo DSP, e a malha para regulação de conjugado implementada pelo inversor de frequência. A comutação entre as malhas de força e velocidade se dará no instante que o usuário toca a barra de comando e impõe uma força mínima. Sem o contato na barra, irá operar a malha de velocidade com referência de velocidade nula, garantindo que o veículo fique parado. Quando há contato na barra, passa a operar a malha de controle de força, de tal forma que da força total de movimento – componentes de carga e aceleração – somente uma parcela constante seja desempenhada pelo usuário. Dessa análise, é possível garantir tal comportamento através da estrutura de controle apresentada na Figura 4.23.

A malha de controle apresentada na figura 4.23 mostra que só há comando para deslocamento do veículo enquanto há força humana detectada pela célula de carga. Como a referência para essa força humana é nula, sempre haverá erro de força enquanto o veículo se desloca. Nesse cenário, a saída do integrador produz um comando de conjugado crescente, o que levaria a acelerações crescentes e o aumento no risco de atropelamento do condutor. Para evitar tal problema, a saída do integrador deverá receber um saturador. O nível de saturação deverá ser cuidadosamente escolhido para que o sistema não tenha efeito *wind-up*, ou seja, caso o nível máximo de saturação seja demasiadamente alto, e o sistema alcance tal nível, caso o usuário comande uma reversão de conjugado, será consumido um tempo muito longo até que tal comando de reversão seja aplicado na referência de conjugado enviada ao inversor.

Além de limitar o nível máximo da referência de conjugado imposta pelo compensador PID, a dinâmica de tal referência também deverá ser compatível com a aceleração típica que as pernas do condutor conseguem imprimir. Isso se deve ao fato de que o sistema, em deslocamento, possuirá comando crescente de aceleração devido ao integrador. Assim sendo, o veículo come-

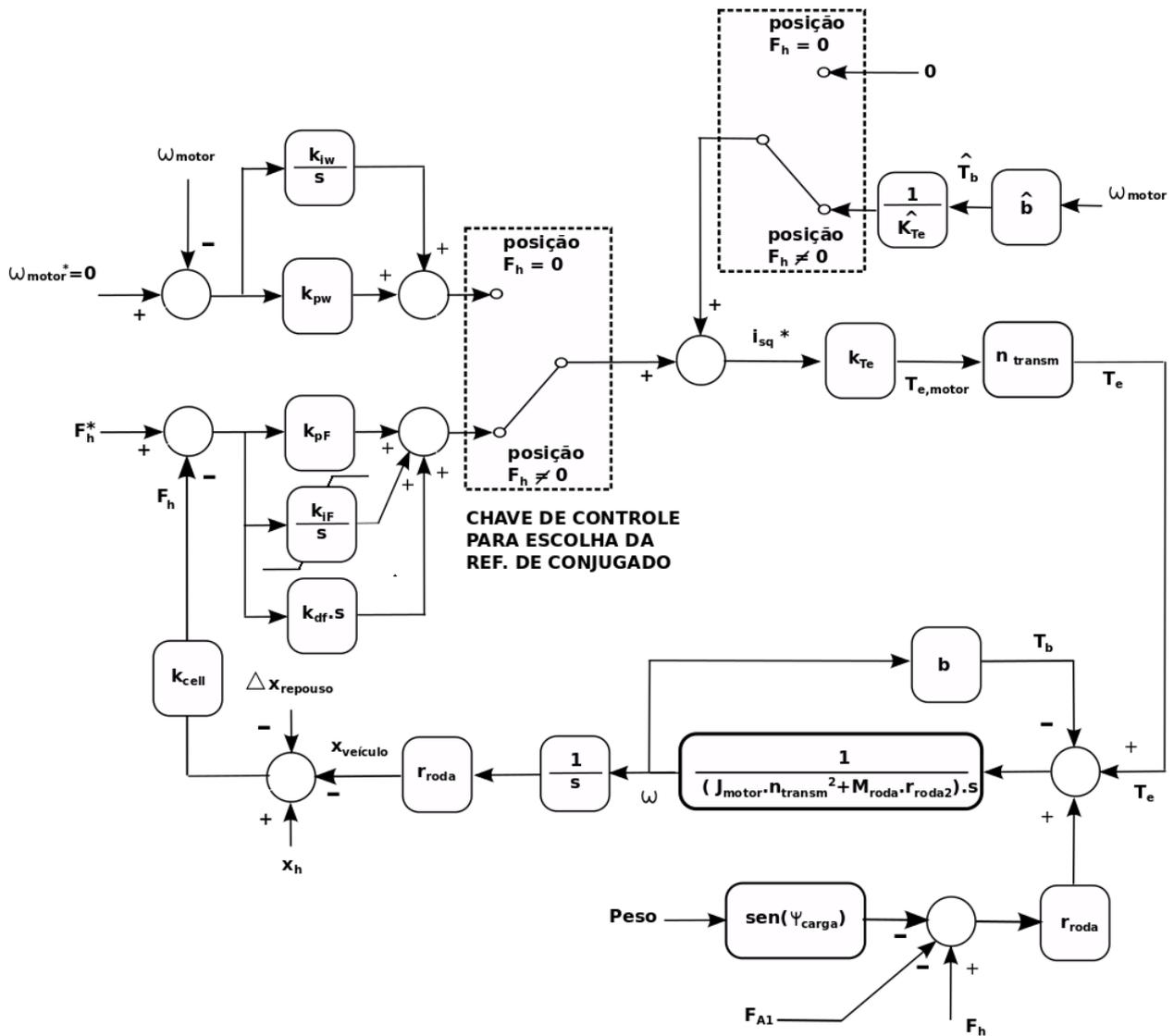


Figura 4.23: Estrutura completa de controle destacando as malhas para controle de força e de velocidade, as quais operam, respectivamente, quando o veículo está em movimento ou parado.

çará a se deslocar mais rápido que o ser humano, levando à tração dos seus braços que estão em contato com a barra de comandos. Quando isso ocorrer, a pessoa naturalmente irá aplicar uma força menor ou de sinal invertido. Nesse momento, o derivador do compensador irá produzir comando de conjugado frenante, levando à redução na velocidade do veículo. Seguindo tal efeito, a pessoa passará a se deslocar mais rápido que o Vecarr e haverá compressão dos seus braços, o que leva à compressão da célula de carga, produzindo um erro positivo de força, o que leva a um comando crescente na saída do integrador e derivador. Tal condição produz um comando de conjugado eletromagnético de aceleração, fazendo com que o veículo aumente sua velocidade novamente. O ajuste dos compensadores deverá ser feito pra que tal processo seja suave, de tal forma que o condutor não seja atropelado e não perceba solavancos em seus braços durante as mudanças de sinal dos comandos de conjugado eletromagnético.

O ajuste dos compensadores do sistema mostrado na Figura 4.23 irá determinar a dinâmica de atuação do veículo. Para o ajuste dessa atuação, destaca-se que o sinal de força imposto pelo condutor do veículo possui a dinâmica do seu braço e, portanto, a compressão ou tração da célula de carga seguirá a mesma dinâmica. Tais deformações da célula serão rejeitadas pelo sistema de controle através da imposição de deslocamento ao veículo. Assim sendo, se a malha de controle for configurada para que o veículo se desloque com dinâmica equivalente ao distúrbio sensoriado na célula de carga, será observado um deslocamento com a mesma dinâmica do braço do condutor, o qual é mais rápido que a sua capacidade de deslocamento com as pernas. Como o condutor do Vecarr geralmente irá trabalhar no plano composto pelas barras dos guidões, se o veículo se deslocar mais rápido do que o condutor, haverá atropelamento. Assim sendo, o ajuste da dinâmica do sistema de controle será feito para que, ao se aplicar uma entrada de força do condutor com a dinâmica do seu braço, seja produzida uma resposta de velocidade com dinâmica compatível a de suas pernas e, além disso, se o usuário mantiver força constante aplicada à barra, não haverá limitação da velocidade final atingida pelo veículo dentro dos limites do atuador. Assim sendo, o sistema de controle irá limitar a taxa de variação da velocidade mas não a velocidade final que pode ser atingida. Para tal ajuste serão apresentadas nas próximas seções as caracterizações das dinâmicas de respostas das pernas de uma pessoa e da sua intenção em fazer um corpo se mover por força aplicada com os seus braços.

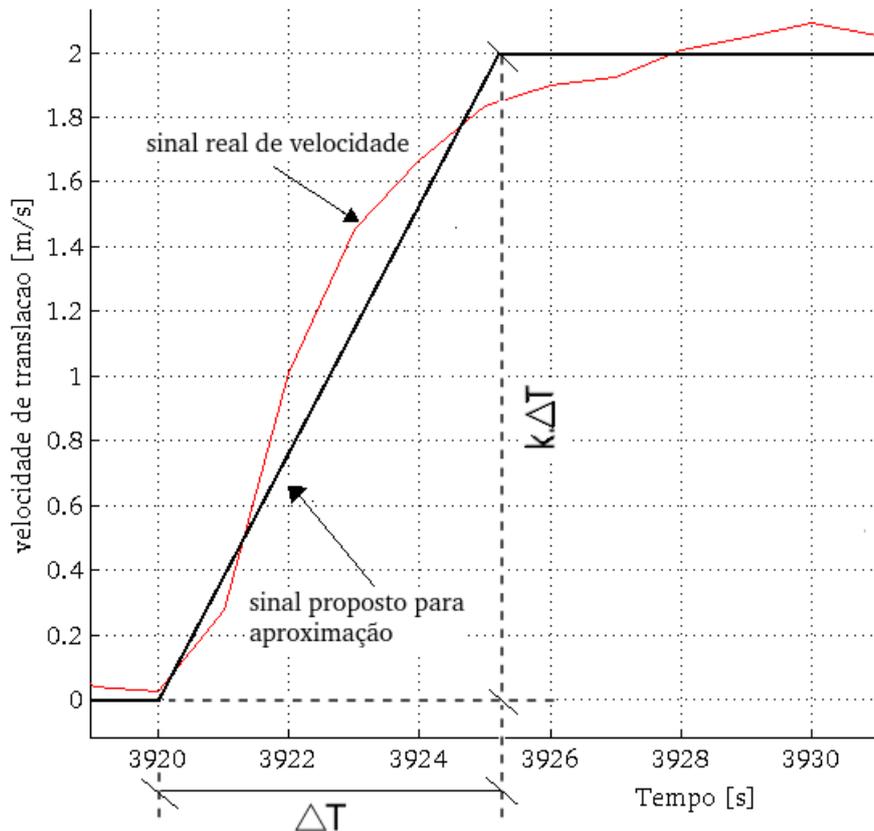


Figura 4.24: Sinal de velocidade desenvolvido por um catador de papel durante a tração não motorizada de seu veículo.

4.3.1 Caracterização do sinal de velocidade das pernas de seres humanos em movimentos acelerados

A avaliação da dinâmica de resposta das pernas do condutor foi apresentada por Peterson *et al* [65]. Em seu estudo, as acelerações e desacelerações produzidas pelas forças de reação do solo foram avaliadas para indivíduos saudáveis, os quais participaram de um experimento de caminhadas com velocidades variando de 0 a 1,8m/s. Nesse experimento foi detectada uma aceleração cujo módulo máximo foi de $0,12\text{m/s}^2$. Além da aceleração, o experimento registrou velocidades finais de 1,8m/s. Tal velocidade final também foi apresentada no estudo de Öberg *et al* [57], o qual avaliou uma velocidade final média para passadas rápidas de 1,77m/s para indivíduos de 30 a 39 anos. Tal informação é coerente com a velocidade final detectada no experimento realizado com catadores de papel durante o desenvolvimento desse estudo de doutorado, no qual mediu-se velocidades máximas de aproximadamente 2,0m/s. Pela forma de onda do sinal de velocidade de uma pessoa, também obtida no experimento com catadores de papel, apresenta-se na Figura 4.24 o sinal que será assumido para caracterização da dinâmica de velocidade para uma pessoa caminhando.

Para caracterizar a banda passante do sinal mostrado na Figura 4.24 foram utilizadas a for-

mulação desse sinal no domínio da frequência, bem como a fórmula de síntese da transformada de Laplace inversa, as quais são mostradas na equação 4.24 e 4.25.

$$velocidade(s) = \frac{k}{s^2} \cdot (1 - e^{-s \cdot \Delta T}) \quad (4.24)$$

$$velocidade(t) = \int_0^{F_{final}} \frac{k}{s^2} \cdot (1 - e^{-s \cdot \Delta T}) \cdot ds \quad (4.25)$$

Para caracterizar o espectro de frequências necessário para sintetizar o sinal da Figura 4.24, foi variada a frequência máxima “ F_{final} ” mostrada na fórmula da transformada de Laplace inversa até que o sinal obtido no domínio do tempo se aproximasse do sinal de velocidade que se deseja sintetizar. Nessa abordagem, observou-se que é possível reproduzir a rampa de velocidades, com boa aproximação, através de componentes espectrais na faixa mínima de frequências de 0 a 1,5Hz. Portanto, para o projeto dos reguladores do sistema de controle do Vecarr, será assumido que a banda passante de resposta das pernas de uma pessoa será igual a 1,5Hz.

4.3.2 Caracterização do sinal de força imposto por seres humanos com intenção de deslocamento de um veículo de carga

Para caracterizar a intenção de movimento imposta por seres humanos para deslocamento do Vecarr, foi implementado um experimento com 108 pessoas, as quais possuem idades variando entre 19 e 57 anos, com massa corporal variando entre 48 e 107kg, sendo o grupo composto por 63 indivíduos do sexo masculino e 45 do sexo feminino.

As pessoas que participaram do experimento foram convidadas a aplicar intenções de aceleração e frenagem ao Vecarr enquanto mesmo se encontrava em movimento. Para a aplicação da força não foi imposta nenhuma regra para tentar avaliar a maneira intuitiva que a pessoa empurraria ou puxaria o veículo.

Para a realização do experimento, o motor elétrico do veículo foi acionado por inversor de frequência, o qual foi configurado para operar com regulação de velocidade e referência igual a 50rpm. Durante esse modo de operação, os participantes do experimento aplicaram intenções de aceleração e frenagem. Nessas intenções, os condutores do veículo impõe um distúrbio de conjugado de carga ao Vecarr, o qual tende a alterar a referência de 50rpm da velocidade angular. Como o sistema opera com regulação de velocidade, o inversor aplica um conjugado de sentido contrário ao do usuário, de tal forma a se garantir a velocidade constante de 50rpm.

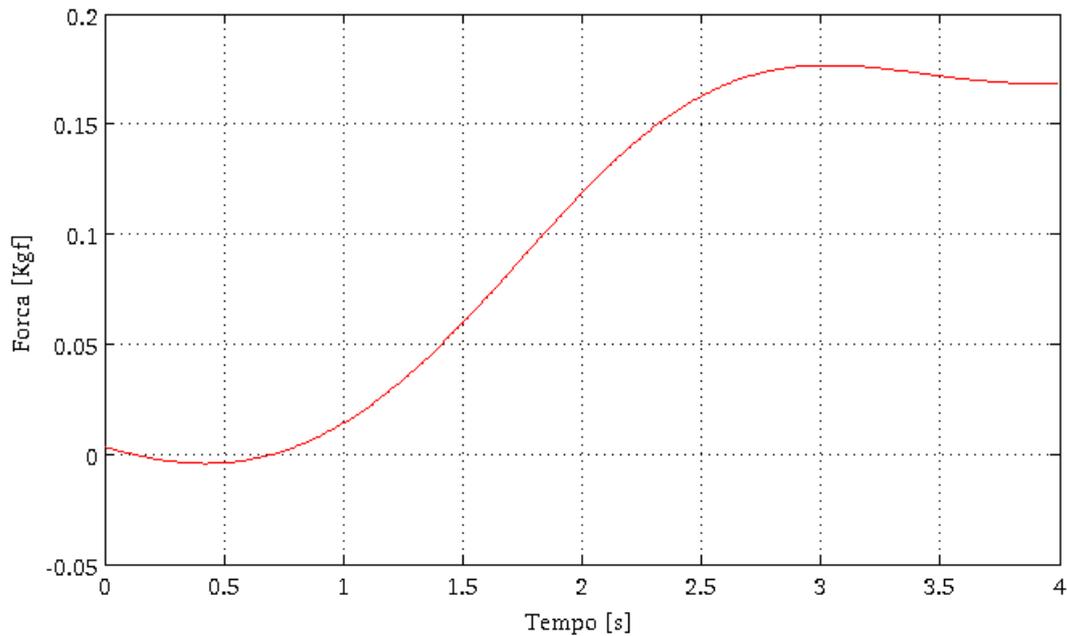


Figura 4.25: Sinal de força imposto por uma pessoa com intenção de frear o Vecarr quando o mesmo já se encontrava em movimento.

Tal valor de conjugado foi então disponibilizado em uma das saídas analógicas do inversor e o respectivo sinal foi amostrado por uma placa de aquisição. Alguns dos sinais adquiridos são apresentados nas figuras 4.25, 4.26 e 4.27.

Os demais sinais de força amostrados no experimento possuem a forma de onda similar às aquelas apresentadas nas figuras 4.25, 4.26 e 4.27. Apesar de ser variável o tempo de duração entre a ausência e o pico de força, bem como ser variável o valor do pico de força máxima, observou-se que todas as formas de onda possuem uma característica com taxa de variação temporal contínua em suas extremidades e um comportamento aproximado de primeira ordem entre a ausência e o pico de força.

Para fins de caracterização do conteúdo espectral dos sinais de força amostrados, os quais serão utilizados para configuração da banda passante do sistema de controle, é suficiente se aproximar os sinais de força a um polinômio de 1ª ordem, cujo valor máximo seja igual ao valor de força máxima média detectada no experimento e cuja duração da rampa de força seja igual ao tempo médio entre a força nula e o pico de força, tal como detectado no experimento com pessoas e mostrado na Figura 4.28.

A aproximação proposta de se caracterizar o sinal de força como sendo uma rampa com valor máximo finito foi feita para todos os sinais adquiridos. Os resultados obtidos para os valores médios da máxima força imposta pelas pessoas e do tempo necessário para que elas alcançassem esse pico de força são apresentados na Tabela 4.5.

Pelos valores médios apresentados na Tabela 4.5, é possível caracterizar uma banda passante

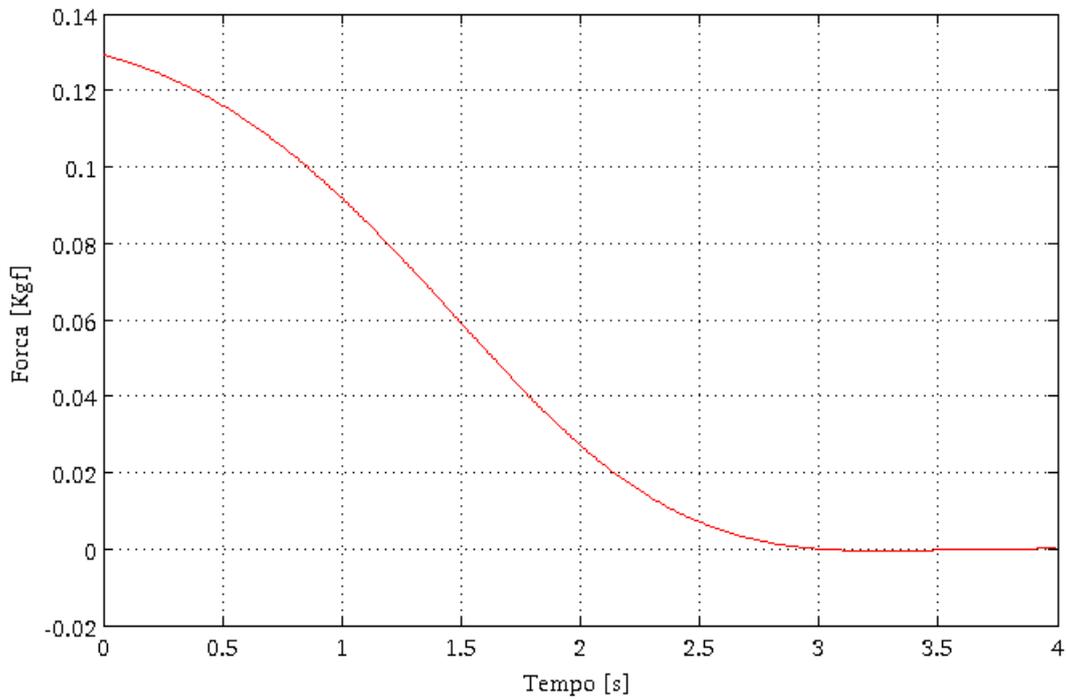


Figura 4.26: Sinal de força imposto por uma pessoa com intenção de acelerar o Vecarr quando o mesmo já se encontrava em movimento.

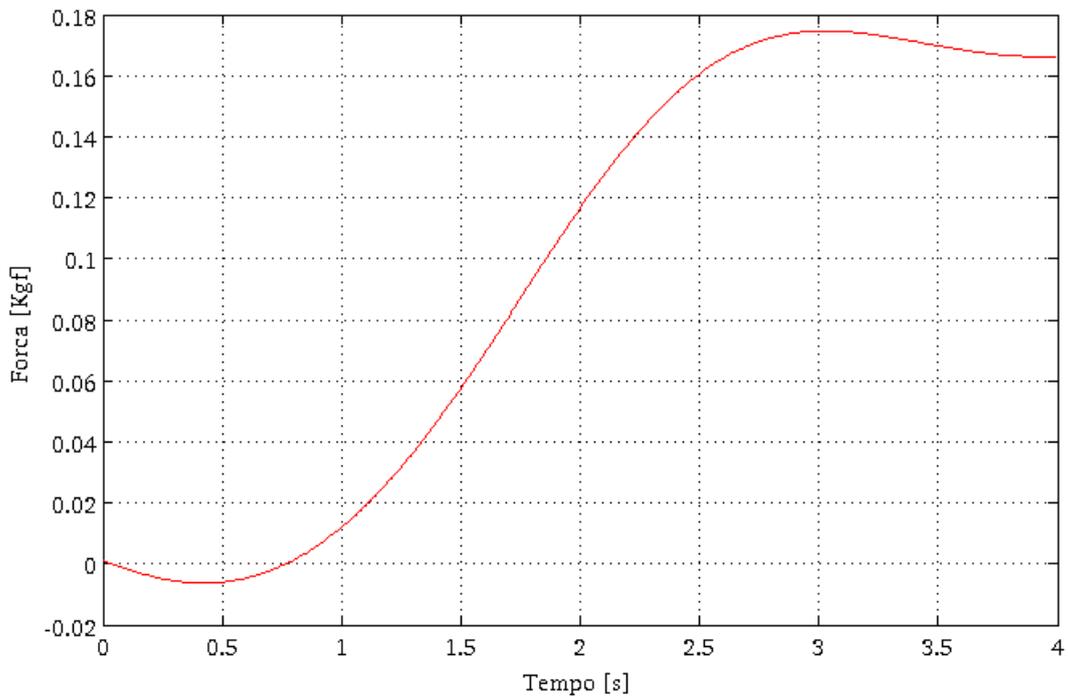


Figura 4.27: Sinal de força imposto por uma pessoa com intenção de frear o Vecarr quando o mesmo já se encontrava em movimento.

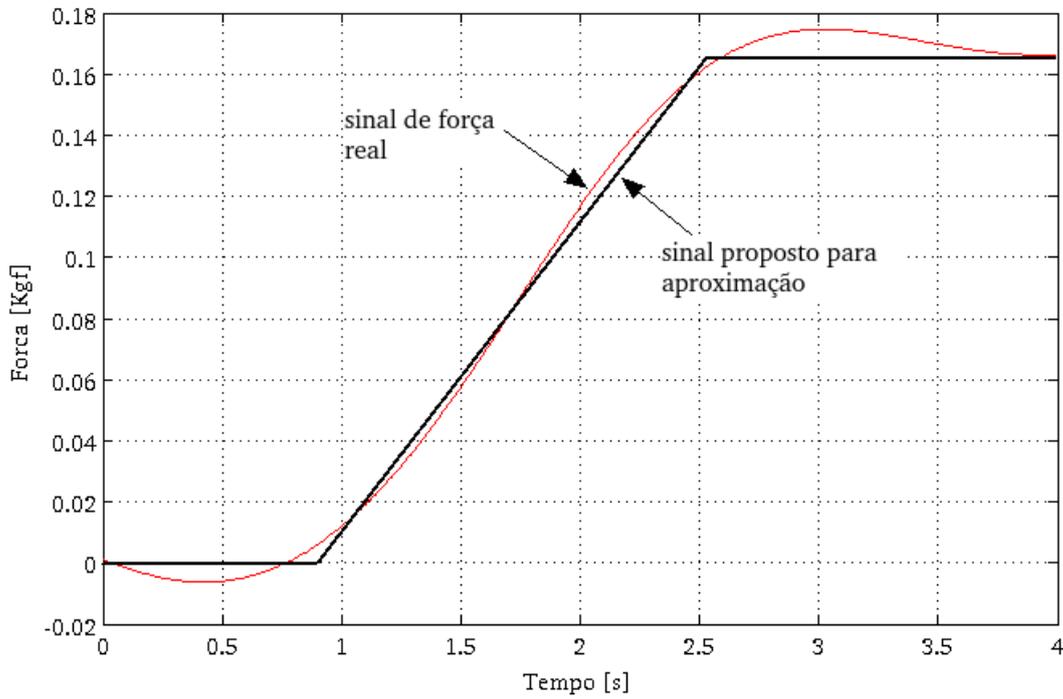


Figura 4.28: Aproximação proposta ao sinal de força como polinômio de 1a ordem com valor máximo limitado.

Tabela 4.5: Forças máxima média e tempo médio para alcance dessa força máxima avaliado para um grupo de 108 pessoas que aplicaram intenções de movimento ao Vecarr.

Força Máxima Média[kgf]	Desvio padrão da força máxima [kgf]	Tempo médio até o alcance da máxima força [s]	Desvio padrão do tempo médio decorrido até o alcance da força máxima [s]
1,86	1,04	2,77	0,63

típica para o sinal de força imposto por pessoas para deslocar um veículo de carga. Tal banda passante poderia ser obtida pela característica no domínio da frequência do sinal de força representado por um polinômio de primeira ordem com valor máximo finito, tal como mostrado na Figura 4.28 e na equação 4.26.

$$Forca(s) = \frac{k}{s^2} \cdot (1 - e^{-s \cdot \Delta T}) \quad (4.26)$$

Tal como mostrado na equação 4.26, a representação no domínio da frequência do sinal de força varia com o inverso do quadrado da frequência, o que leva a um decaimento muito rápido do sinal e, portanto, empobrece a caracterização do sinal como sendo dado pelo conteúdo espectral desde a frequência DC até a frequência do ponto de ganho -3dB, tal como ocorre com sinais exponenciais. Para então fazer a caracterização espectral do sinal, foi aplicada a transformada de Fourier inversa ao sinal mostrado na Figura 4.26. Tal transformada é mostrada na equação 4.27.

$$Forca(t) = \int_0^{F_{final}} \frac{k}{s^2} \cdot (1 - e^{-s \cdot \Delta T}) \cdot df \quad (4.27)$$

Aplicando-se a equação 4.27 a uma plataforma de cálculo computacional, obteve-se um conjunto de sinais no domínio do tempo a partir da avaliação de diferentes frequências finais - F_{final} - utilizadas no limite superior de integração. Desse estudo, observou-se que sinais no domínio do tempo sintetizados com componentes espectrais maiores que 3,5Hz caracterizam com boa aproximação o mesmo sinal de força em rampa com as características médias avaliadas no experimento. Portanto a dinâmica do sinal de força aplicada por pessoas será caracterizada por uma banda passante igual a 3,5Hz e esse valor será utilizado, na próxima seção, para sintonia dos compensadores da malha de controle apresentada na Figura 4.23.

4.3.3 Sintonia dos ganhos dos compensadores

Tendo sido caracterizadas as dinâmicas de entrada e saída do sistema de controle - os sinais de força humana e de velocidade do ser humano que conduz o veículo - será feita a sintonia do ganho dos compensadores para que o veículo apresente uma resposta dinâmica adequada, ou seja, para que o veículo seja capaz de acompanhar a dinâmica das pernas de uma pessoa que deseja correr, mas que o veículo não responda com a dinâmica dos braços, uma vez que a última situação levaria a acidentes.

Do estudo de Peterson *et al* [65], foi caracterizada a aceleração de 0,12m/s² típica pra

pessoas se deslocamento em ritmo normal de caminhada. Durante o monitoramento de catedores de papel, observou-se em alguns instantes o desenvolvimento de velocidades de 2,0m/s, partindo do repouso, e em intervalos de 4 a 6 segundos. Nesses cenários, caracterizam-se acelerações de 0,5 a 0,33m/s² de corrida com a tração de um veículo carregado. Como a proposta de controle nesse tópico da pesquisa visa que o veículo seja capaz de acompanhar a dinâmica de corrida de uma pessoa, a malha de controle será ajustada com dinâmica compatível àquela que caracteriza rampas de velocidade, com aceleração de 0,5m/s² e velocidade final de 2,0m/s. Para a caracterização de tais sinais, o conteúdo espectral deve possuir componentes na faixa mínima compreendida entre 0 e 1,5Hz. Assim sendo, o sistema receberá comandos do braço com banda passante de 3,5Hz, e apresentará como resposta uma velocidade com até 1,5Hz.

Para garantir tal comportamento passa-baixas para o sistema de controle, o compensador será ajustado para que o pólo de maior valor absoluto seja alocado em 1,5Hz. Assim sendo, mesmo que o braço imponha um sinal com componentes espectrais de frequência maior que 1,5Hz, tais componentes serão atenuadas na velocidade.

Para caracterizar a relação entre os pólos do sistema e os ganhos dos compensadores, apresenta-se na equação 4.28 a função de transferência do sinal de força do operador para a velocidade desenvolvida pelo veículo. Tal função foi desenvolvida pelo diagrama de blocos da Figura 4.23.

$$\frac{\omega(s)}{F_h(s)} = \frac{s}{(J + M.r^2).s^2 + (b - k1.k_{df}).s - k1.k_{pf} - k1.\frac{k_{if}}{s}} \quad (4.28)$$

$$\text{onde : } k1 = K_{cell}.k_{te}.n_{transm}.r_{roda} \quad (4.29)$$

Como a massa embarcada no sistema é variável, haverá alteração na posição dos pólos, o que comprometerá o ajuste dinâmico feito com um valor específico de projeto assumido para a massa. Para reduzir o impacto da variação de massa sobre a posição dos pólos, o ajuste de ganhos dos compensadores será feito sob a premissa da robustez dinâmica, ou seja, os pólos serão afastados em uma década.

Considerando um projeto de sintonia de ganhos feito sob a premissa de robustez, os pólos do sistema serão alocados em 1,5 , 0,15 e 0,015Hz. Inicialmente, será considerado o veículo à vazio para o projeto de sintonia e, posteriormente, será avaliada a migração de pólos para o sistema à plena carga. Nessa abordagem, a resposta em frequência do denominador da função mostrada em 4.28 terá o aspecto geral mostrado na Figura 4.29.

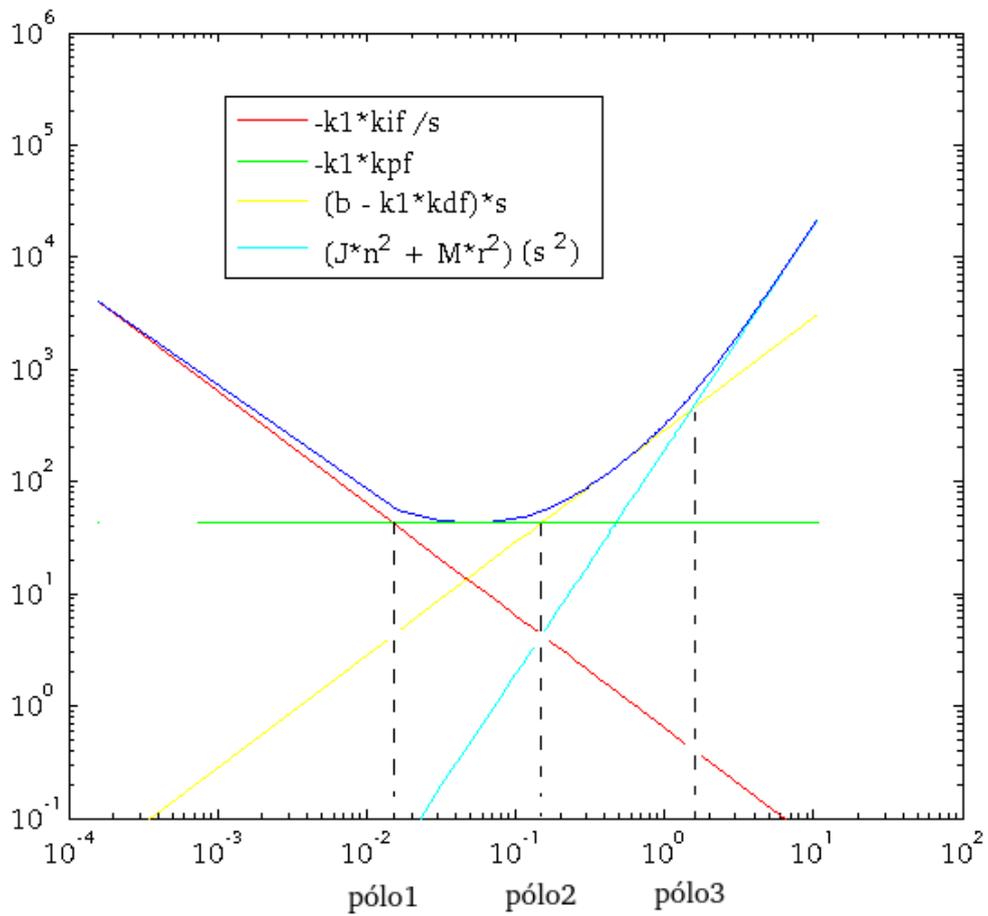


Figura 4.29: Resposta em frequência para o denominador da função de transferência com alocação de pólos em frequências separadas de uma década.

Tal como mostrado na Figura 4.29, para frequências próximas ao pólo de 1,5Hz, o comportamento do sistema é dominado pelos termos “ $(J + M.r^2).s^2$ ” e “ $K_{cell}.k_{te}.n_{transm}.r_{roda}.k_{df}.s$ ”. Assim sendo, o polinômio característico do sistema nas proximidades de -1,5[Hz] e, conseqüentemente, o ganho k_{df} , podem ser avaliados da maneira mostrada na equação 4.31.

$$(J + M.r^2).s_{polo1}^2 + (b - K_{cell}.k_{te}.n_{transm}.r_{roda}.k_{df}).s_{polo1} = 0 \quad (4.30)$$

$$k_{df} = -2,8419 \times 10^{-4}[A.s/N] \quad (4.31)$$

Da mesma maneira, tal como mostrado na Figura 4.29, o comportamento dinâmico do sistema em frequências próximas a -0,15Hz é dominado pelos termos “ $K_{cell}.k_{te}.n_{transm}.r_{roda}.k_{df}.s$ ” e “ $K_{cell}.k_{te}.n_{transm}.r_{roda}.k_{pf}$ ”. Nas proximidades dessa frequência, o polinômio característico pode ser aproximado da maneira mostrada na equação 4.32 e, conseqüentemente, o ganho K_{pf} pode ser obtido da maneira apresentada na equação 4.34.

$$K_{cell}.k_{te}.n_{transm}.r_{roda}.(k_{df}.s + k_{pf}) - b.s = 0 \quad (4.32)$$

$$para s \approx 2.\pi.0,15 \quad (4.33)$$

$$\Rightarrow k_{pf} = -k_{df}.s_{polo2} = -2,8543 \times 10^{-4}[A/N](parab \approx 0) \quad (4.34)$$

Da mesma maneira, na vizinhança do pólo alocado em -0,015Hz, o comportamento dinâmico do sistema será dominado pelos termos “ $K_{cell}.k_{te}.n_{transm}.r_{roda}.k_{pf}$ ” e “ $K_{cell}.k_{te}.n_{transm}.r_{roda}.k_{if}/s$ ”. Nessa faixa de frequências o polinômio característico mostrado na equação 4.28 pode ser aproximado da maneira apresentada na equação 4.35 e, conseqüentemente, o ganho k_{if} pode ser obtido da maneira apresentada na equação 4.37.

$$K_{cell}.k_{te}.n_{transm}.r_{roda}.(k_{pf}.s + k_{if}/s) = 0 \quad (4.35)$$

$$para s \approx 2.\pi.0,015 \quad (4.36)$$

$$k_{if} = -k_{pf}.s_{polo3} = -2,6901 \times 10^{-5}[A/(N.s)] \quad (4.37)$$

Tabela 4.6: Tabela contendo os pólos do sistema de controle apresentado na Figura 4.23 para os compensadores sintonizados como sendo $k_{df} = -2,8419 \times 10^{-4} [\text{A.s/N}]$, $k_{pf} = -2,8543 \times 10^{-4} [\text{A/n}]$ e $k_{if} = -2,6901 \times 10^{-5} [\text{A}/(\text{N.s})]$.

Massa embarcada [kg]	Polos
500kg	-0,4129, -0,2056 e -0,0168 Hz
42,9kg	-1,33, -0,15 e -0,017 Hz

Considerando a sintonia de ganhos do controlador apresentada nas equações 4.31, 4.34 e 4.37, apresenta-se na Tabela 4.6 a alocação de pólos para o sistema à vazio e com carga nominal de 500kg.

Tal como mostrado na Tabela 4.6, o pólo de menor valor absoluto do sistema se mantém alocado em aproximadamente -0,015Hz para o sistema à vazio ou em plena carga. Além disso, quando a massa embarcada varia, o sistema não se torna instável. Portanto o sistema de controle não inibirá deslocamentos do usuário feitos à dinâmica de suas pernas, bem como não irá o expôr a situações de risco por respostas do veículo que sejam feitas à dinâmica do seu braço, a qual é muito mais rápida que a dinâmica de suas pernas.

Tal como mostrado na Figura 4.23, a malha de controle de conjugado ou, similarmente, da componente i_{sq} da corrente de estator, é interna à malha para controle de força e, assim sendo, sua banda passante deve ser maior que aquela configurada para a malha externa de força. Como a malha de força possuirá banda passante compatível com a dinâmica das pernas humanas, ou seja, 1,5Hz, a malha para regulação de conjugado deverá ter banda passante mais larga, a qual será configurada em 3Hz. Tal malha é implementada por inversor de frequência e o ajuste de sua banda passante é feito através de ganhos parametrizáveis, os quais não são configuráveis em unidades do sistema internacional de medidas. O fabricante do inversor também não informa a relação entre as unidades aplicáveis a seus parâmetros e as unidades do sistema internacional de medidas. Para então garantir que o sistema de controle de conjugado do inversor tenha banda passante de 3Hz, o inversor foi parametrizado para controle de velocidade e recebeu, como referência para essa grandeza, um sinal dente-de-serra com 3Hz de frequência e 500rpm de valor de pico. O ganho proporcional da malha de corrente i_{sq} foi então ajustado até que a velocidade real no eixo do motor seguisse sua referência. Se a velocidade seguiu uma referência em rampa e o motor opera à vazio, conclui-se que o conjugado eletromagnético imposto possui forma de onda em trem de pulsos e com a mesma frequência do sinal dente-de-serra. Avaliou-se nesse cenário que o ajuste necessário para o ganho proporcional da malha de corrente foi de 0,72 em unidades do inversor. O ganho integral de tal malha foi configurado em 0 para que o mesmo não produza um comando de conjugado que seja concorrente ao comando produzido

na saída do compensador integral da malha de força.

Para avaliar o desempenho do sistema proposto, apresenta-se na próxima seção a simulação do sistema com a aplicação dos resultados do projeto de sintonia obtidos nessa seção.

4.3.4 Simulação do sistema de controle operando com regulação de força constante

O sistema de controle apresentado na Figura 4.23 foi simulado considerando os ajustes dos compensadores mostrados nas equações 4.31, 4.34 e 4.37. Para essa simulação, há a necessidade de se aplicar como entradas a força humana F_h à barra de contato e a posição da barra de contato x_h imposta pelos braços da pessoa. Como apresentado no capítulo de revisão bibliográfica, Kazerooni [45] mostra que tais entradas humanas são difíceis de serem produzidas em ambientes de simulação pois dependem de respostas cognitivas das pessoas, bem como de sua estrutura biológica e estado emocional. No caso da força humana imposta à barra, há uma referência de posicionamento para o veículo presente na mente da pessoa. Para aplicar o seu comando de força, a pessoa avalia onde o veículo está bem como a sua sensibilidade no contato com o veículo. Se, por exemplo, a sua região de contato com o veículo possuir quinas cortantes, a pessoa irá reduzir a força aplicada, mesmo embora o veículo não esteja posicionado na referência desejada. Por outro lado, se a região de contato não possuir quinas cortantes mas a pessoa estiver cansada, o seu esforço será diferente daquele observado quando o seu corpo não apresenta exaustão física.

Assim sendo, a simulação será desenvolvida considerando que a pessoa aplica força com a dinâmica de seus braços sobreposta à dinâmica de deslocamento de suas pernas, tal como ocorre com uma pessoa que anda e aplica força sobre um objeto. Assim sendo, a entrada de posicionamento da barra de contato x_h será dada pela superposição do sinal em parábola sintetizado pela integração da rampa de velocidade das pernas, o qual terá a aceleração avaliada no estudo de Peterson *et al* [65], juntamente com o sinal de força em rampa com banda passante de 3,5Hz avaliado nos experimentos desenvolvidos nessa tese de doutorado. Como a dinâmica de força dos braços é muito mais rápida que a das pernas, enquanto o usuário aplicar força variável, será considerado que o veículo permaneça basicamente parado e, assim sendo, o deslocamento da barra imposto pelos braços será considerado igual à força humana sobre a constante elástica da célula de carga.

Por ação e reação, a força aplicada pela pessoa à célula de carga é a mesma que a pessoa percebe em suas mãos. Assim sendo, a malha que regula a força realimentada da célula de

carga estará regulando também a força imposta pelo usuário. Para essa regulação, será aplicado uma referência de força F^* igual a 0N.m , ou seja, toda a força necessária para rejeitar carga e impôr aceleração ao veículo será imposta pelo acionamento elétrico. Outros níveis de força de referência F^* são possíveis de se implementar, porém demandam o cuidado de se alterar o sinal do comando de acordo com o sentido da força aplicada pela pessoa pois, caso contrário, o sistema pode desenvolver conjugado no sentido contrário àquele desejado para o movimento. Tal situação se exemplifica se fosse aplicada $F^* = +1\text{kgf}$ pois, nesse cenário, se o usuário desenvolver uma força menor que 1kgf , o erro de força será positivo, demandando conjugado positivo do acionamento. Por outro lado, se a força desenvolvida pelo usuário for maior que $1,0\text{kgf}$, o erro de força será negativo, o que produzirá um comando de conjugado negativo mesmo embora o usuário queira se deslocar pra frente. Esses dois exemplos mostram que a mesma intenção de movimento no sentido frontal seria regulada pelo sistema com conjugados de sentidos opostos. Tal situação já não ocorre se o sistema de controle regular a força com uma referência F^* igual a 0N.m .

Para avaliar o desempenho do sistema serão consideradas duas situações: na primeira delas o veículo será acelerado e frenado com a aceleração de $0,12\text{m/s}^2$ para caminhada normal proposta por Peterson *et al* [65], considerando uma massa total embarcada de 500kg e deslocamento em uma superfície com ângulo de inclinação igual a 9° . Na segunda simulação, será considerada a mesma carga embarcada de 500kg , porém será avaliado o desempenho do veículo quando o usuário deseja impôr ritmo de corrida ao deslocamento, ou seja, acelerar o sistema até uma velocidade final de $2,0\text{m/s}$ com uma aceleração de $0,5\text{m/s}^2$, tal como avaliado em algumas situações monitoradas com catadores de papel. Além de impôr aceleração mais elevadas as suas pernas, serão avaliadas as respostas do sistema para dois valores de força de diferentes amplitudes impostas pelo usuário, ou seja, será verificado se o veículo respeita a intenção de se ter uma maior taxa de variação de velocidade quando o usuário impõe uma força final mais elevada.

Para a primeira situação proposta (aceleração das pernas igual a $0,12\text{m/s}^2$) apresentam-se nas figuras 4.30, 4.31 e 4.32, os respectivos sinais de velocidade do veículo, posição da barra imposta pela pessoa e posição do veículo.

Tal como mostrado nas figuras 4.31 e 4.32, o veículo acompanhou dinamicamente o deslocamento imposto pelo usuário e, como mostrado pela Figura 4.30, o sistema respondeu ao comando do usuário impondo ao veículo uma velocidade com dinâmica compatível com àquela apreciada no deslocamento humano, o que reduz a chance de atropelamentos do condutor por

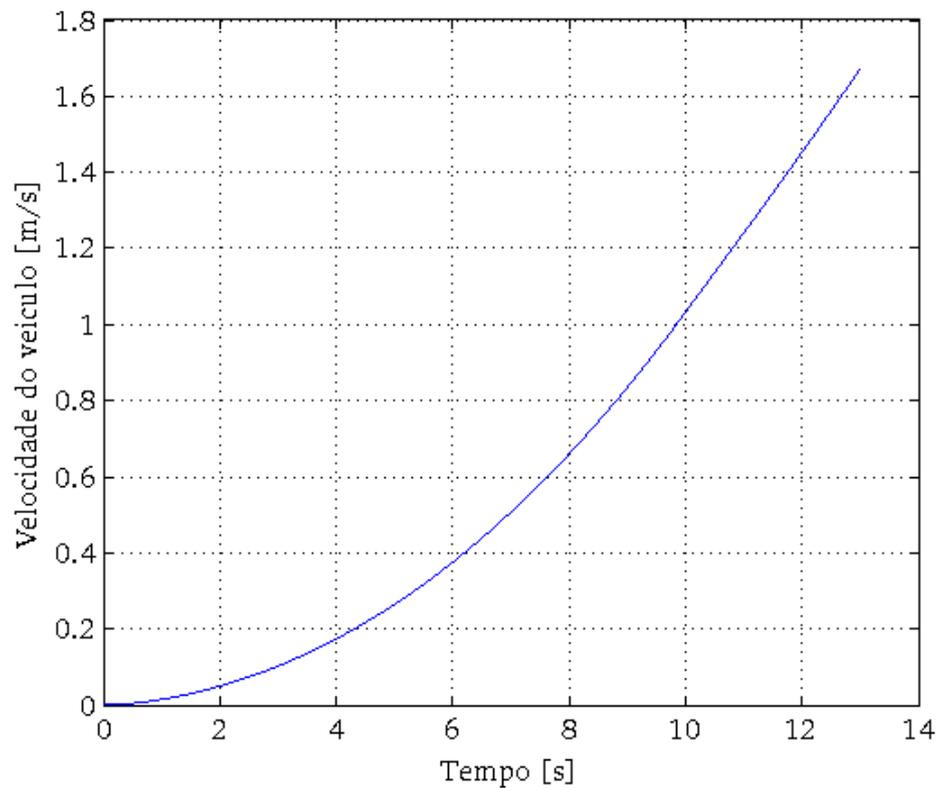


Figura 4.30: Velocidade desenvolvida pelo veículo para deslocamento em ritmo de caminhada.

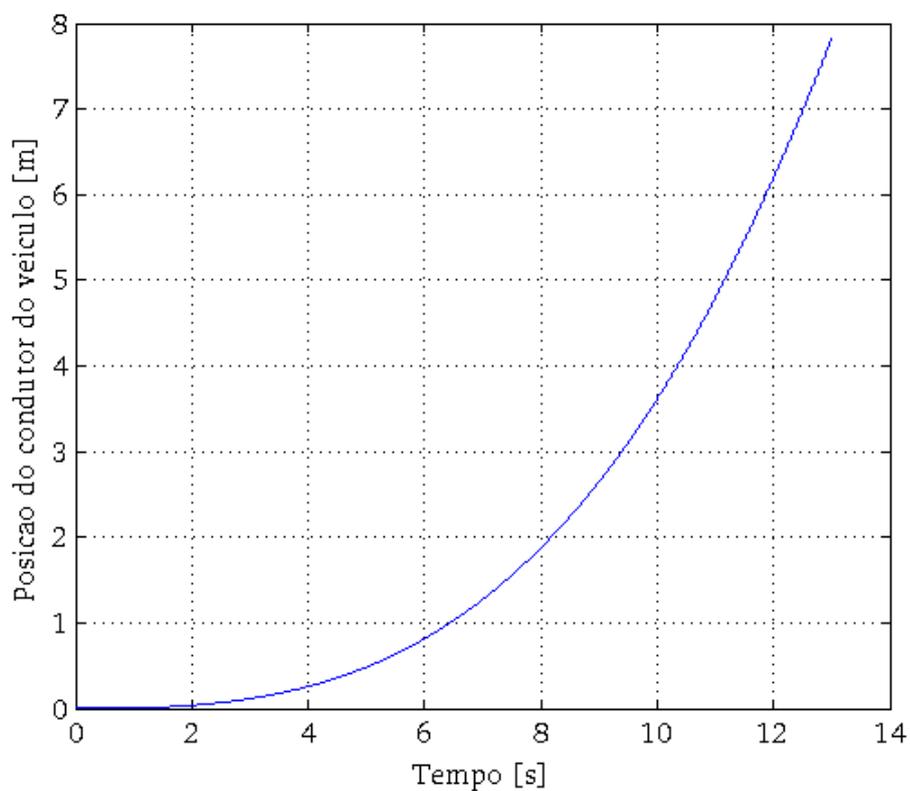


Figura 4.31: Posição do condutor para deslocamento em ritmo de caminhada.

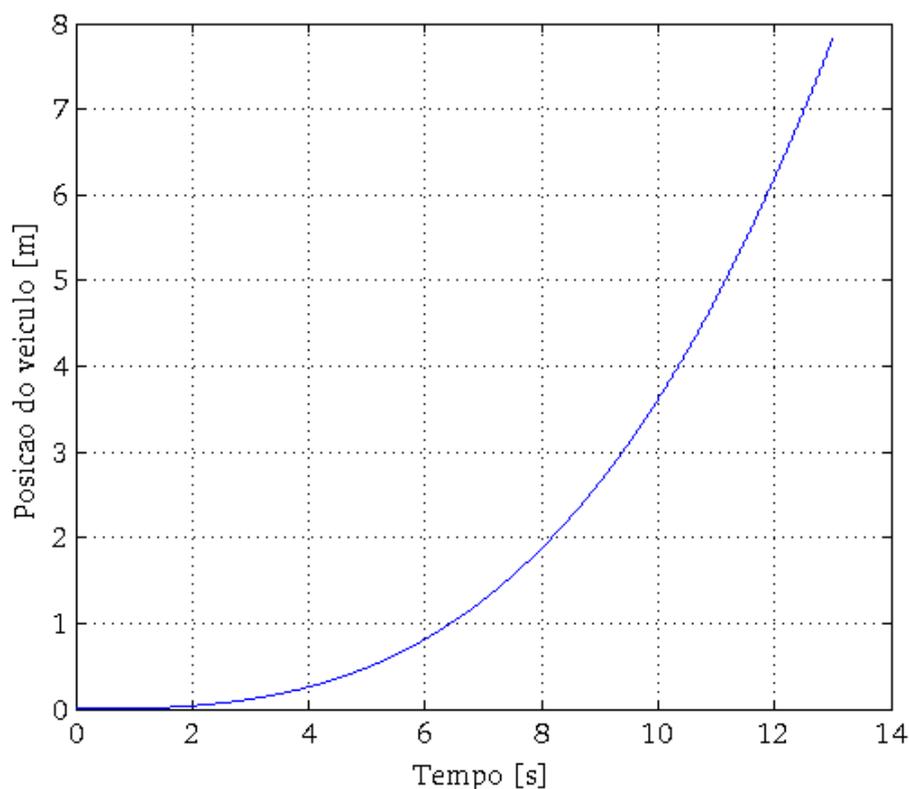


Figura 4.32: Posição do veículo para deslocamento em ritmo de caminhada.

parte do veículo.

Para avaliar o comportamento do veículo na 2ª situação de simulação proposta, ou seja, deslocamento em subida, com carga nominal e ritmo de corrida, apresenta-se nas figuras 4.34, 4.35 e 4.36 as curvas dos respectivos sinais de velocidade do veículo, posição da barra imposta pela pessoa e posição do veículo para o usuário demandando deslocamento em ritmo de corrida, com aceleração de $0,5\text{m/s}^2$, ou atingindo-se velocidade final de $2,0\text{m/s}$ em 4s , tal como apreciado em alguns instantes de monitoramento dos catadores de papel.

Para avaliar o comportamento do veículo na 2ª situação proposta, serão impostos dois sinais de força de mesma dinâmica porém com valores finais diferentes. Os dois sinais atingem seus valores máximos em 3s e terão as respectivas formas de onda mostradas na Figura 4.33. Nesse cenário será avaliada a velocidade do veículo quando o usuário aplica forças de diferentes amplitudes, situação na qual o mesmo deseja que o veículo se desloque com diferentes acelerações. Como resultado, apresenta-se na Figura 4.34, 4.35 e 4.36 as curvas dos respectivos sinais de velocidade do veículo, posição da barra imposta pela pessoa e posição do veículo, para as duas forças aplicadas. Os sinais resultantes de cada força são sobrepostos à mesma curva para facilitar a comparação.

Observa-se na Figura 4.34 que para a força de maior amplitude aplicada ao veículo - 100N - o mesmo atingiu a velocidade de $2,0\text{m/s}$ em $4,5\text{s}$, enquanto para a força final de 33N o

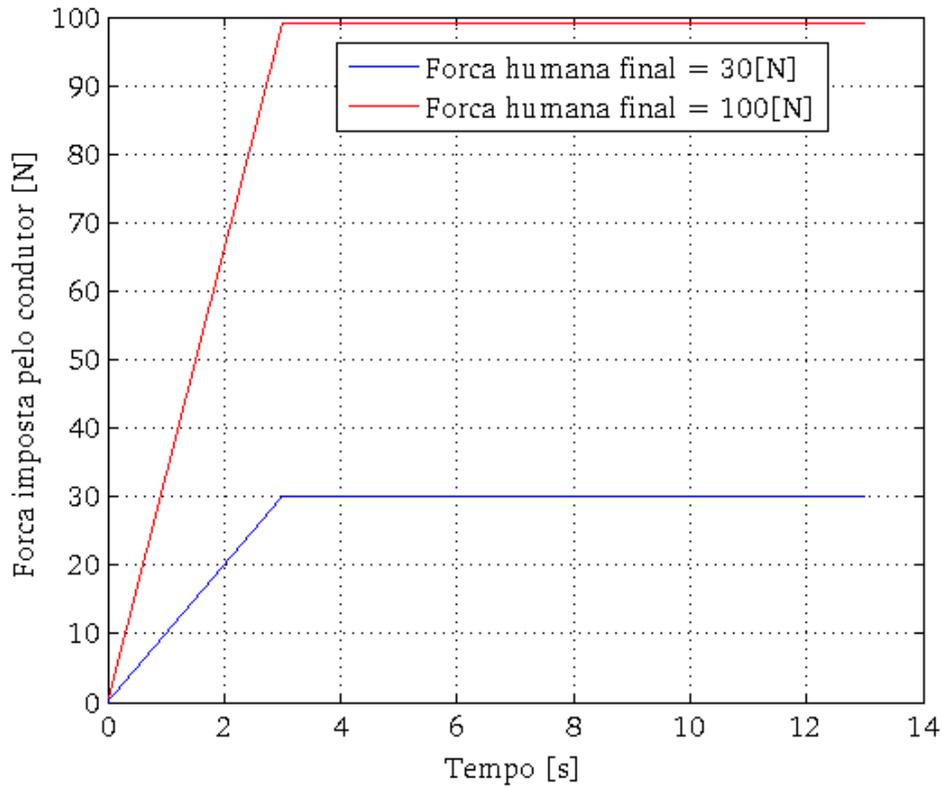


Figura 4.33: Força humana aplicada ao veículo para deslocamento em ritmo de corrida.

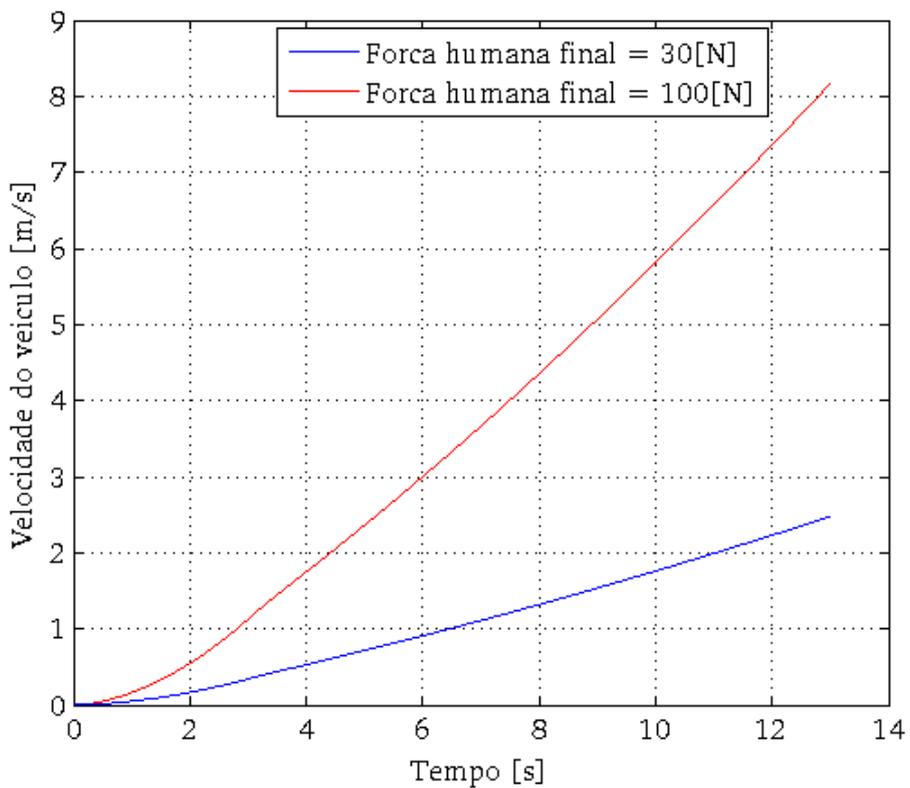


Figura 4.34: Velocidade desenvolvida pelo veículo para deslocamento em ritmo de corrida.

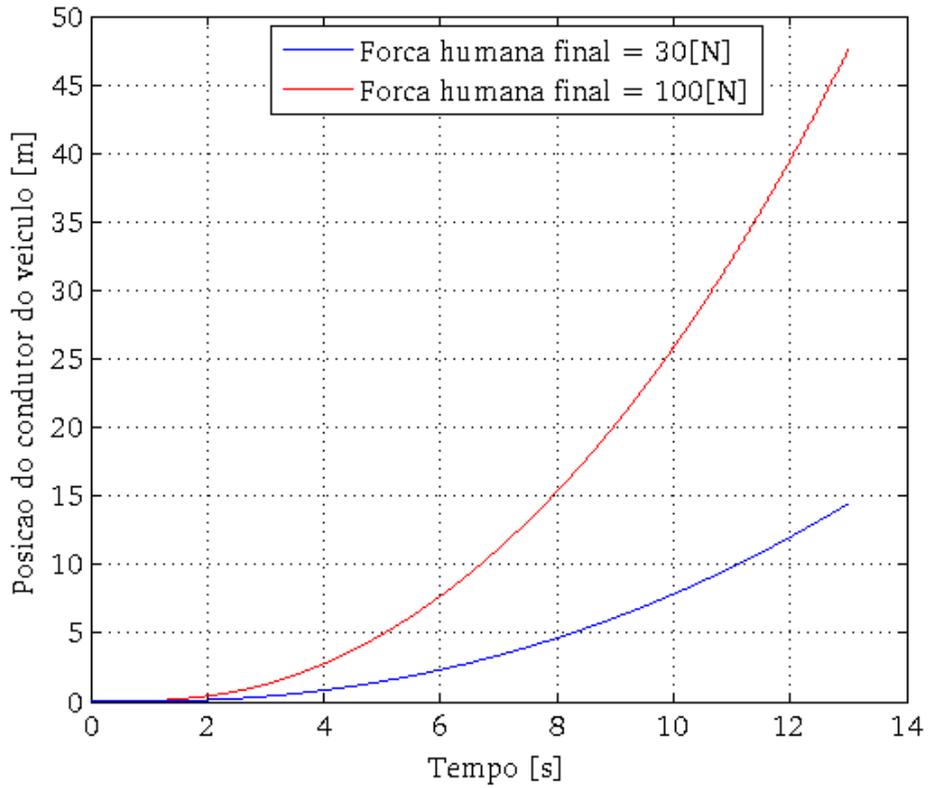


Figura 4.35: Posição do condutor para deslocamento em ritmo de corrida.

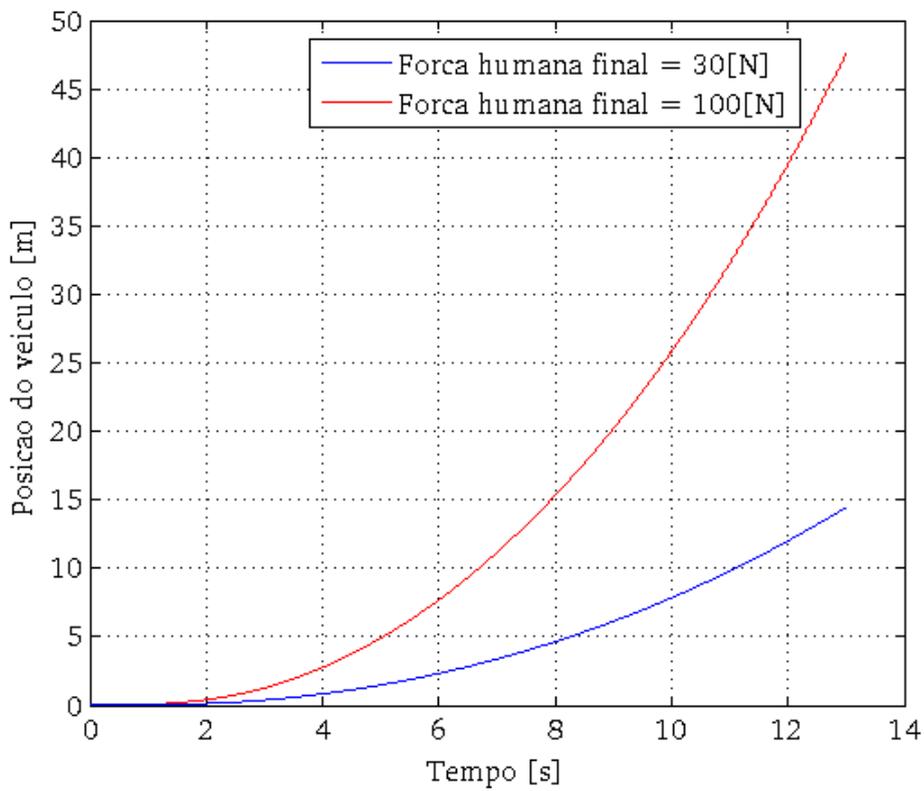


Figura 4.36: Posição do veículo para deslocamento em ritmo de corrida.

veículo atingiu 2,0m/s de velocidade em 9,0s. Assim sendo, observa-se que o veículo respeita a intenção do usuário de imprimir mais aceleração ao sistema ao aplicar forças de diferentes amplitudes. Além disso, ao contrário do sistema de controle com emulação da impedância mecânica para garantir qualidade ao toque, o atual sistema analisado não inibe a velocidade final que o usuário possa desenvolver sem exigir de tal usuário um aumento da força que ele impõe à barra de contato. Observa-se também que, mesmo quando o usuário impõe uma força final de 100N, a qual é compatível ao içamento de um alteres de 10kg com velocidade constante, a taxa de variação da velocidade não é incompatível com aquela tipicamente desenvolvida pela perna humana, ou seja, o veículo leva 4,5s para atingir a velocidade de 2,0m/s, tal como monitorado em algumas situações de máxima aceleração impressa por catadores de papel ao veículo carregado e totalmente tracionado pelo braço humano. Destaca-se também que a sintonia dos compensadores projetadas na seção anterior não levaram a ganhos adequados para o sistema, ou seja, apesar da alocação dos pólos conferirem dinâmica adequada de resposta, o ganho em velocidade foi muito baixo para cada 1[N] de força humana aplicada à entrada do sistema. Como os compensadores foram projetados sob a premissa da robustez, se os ganhos k_{df} , k_{pf} e k_{if} forem amplificados pela mesma quantidade, são preservados os dois pólos de menor valor absoluto do sistema, e somente se altera mais significativamente o pólo que é mais sensível à massa, ou seja, o pólo de maior valor absoluto. Tal pólo tem seu valor aumentado com o aumento do ganho k_{df} para a mesma massa embarcada. Tal estratégia foi implementada para as simulações apresentadas nessa seção, sendo os ganhos do sistema aumentados de 100 vezes. Como avaliado nas simulações, tal aumento levou à dinâmica e ganho satisfatórios para o sistema. Mesmo embora a posição do último pólo tenha aumentado, observou-se que a dinâmica do sistema ainda se manteve satisfatória às premissas do projeto, indicando-se portanto que a resposta correspondente à fração parcial de tal pólo não é a de maior ganho para o sistema.

4.4 Conclusões

Foram apresentadas nesse capítulo duas propostas para o controle e operação do Vecarr. Tais propostas visam atender à demandas de públicos específicos a partir da mesma base mecânica para o veículo.

Na primeira proposta, o sistema de controle do veículo foi desenvolvido para priorizar a sensação de contato de boa qualidade às pessoas durante a cooperação com o Vecarr. Sob essa premissa, o comportamento dinâmico do acionamento elétrico foi ajustado para que o usuário perceba o veículo como sendo um sistema massa-mola-amortecedor equivalente cujos

parâmetros conotem a sensação de se tocar algo tranquilizante, flexível, agradável e com resposta parecida àquela de um ser humano. Devido à atuação do amortecedor equivalente, tal proposta é também conveniente para o *firmware* de controle do Vecarr em cenários onde se deseja inibir velocidades finais muito elevadas, tanto com a finalidade de se prevenir acidentes, quanto com a finalidade de se evitar prejuízos materiais.

Para a segunda proposta de controle, buscou-se regular a posição do veículo para garantir a imposição de esforço constante pelo usuário. Nessa proposta, o sistema de controle foi ajustado para que o veículo possa adquirir velocidades finais ilimitadas, sem exigir esforço crescente do usuário, tal como ocorre na primeira proposta de controle apresentada. A sintonia do sistema também foi baseada na compatibilidade entre a dinâmica de pernas e braços do usuário. Assim sendo, mesmo embora o condutor do veículo possa aplicar esforços com a dinâmica de 3,5Hz do seu braço, o deslocamento do veículo não irá acompanhar tal dinâmica para não haver atropelamentos.

Convém porém destacar que em todas as propostas há a preservação da condução intuitiva por parte do usuário, com redução no esforço efetivo demandado dos mesmos para deslocamento de carga, com a imposição de velocidade pelo condutor e com a garantia de manutenção do veículo parado quando o usuário não tocá-lo, mesmo em planos inclinados. Destaca-se também que por alterações de *software* é possível alterar o desempenho do veículo de maneira similar ao que se observa em um modelo de automóvel onde o fabricante deseja comercializar as versões “Conforto” e “Esportiva”. Na primeira proposta de controle, onde o veículo emula um sistema massa-mola-amortecedor com a percepção de qualidade no contato, o veículo opera sob as premissas da versão "Conforto". Na segunda proposta, onde o usuário pode impôr a velocidade final que quiser, o veículo opera em condições similares à versão "Esportiva".

Capítulo 5

Considerações tecnológicas do Vecarr

Durante o desenvolvimento do veículo, desde a fase de monitoramento dos catadores de papel até a construção do Vecarr, houve uma série de soluções técnicas desenvolvidas para a operação de sistemas eletrônicos embarcados, a síntese do conversor de energia, os problemas de *offset* em sinais de sensores, as limitações de representação numérica de algumas variáveis no DSP, a recuperação mecânica do Vecarr e a presença de ruídos irradiados e conduzidos nos sistemas de potência e de sinal. Para todas as dificuldades listadas, foram aplicadas soluções técnicas interessantes cuja ausência inviabilizaria o funcionamento do veículo. Considerando que outras soluções veiculares ou sistemas de cooperação homem-robô tracionados à base de acionamento elétrico possuem diversas características semelhantes ao Vecarr, e considerando também que a solução dos problemas de síntese do veículo consumiram meses de trabalho, justifica-se a apresentação formal no presente texto dos problemas e suas respectivas soluções.

Para organizar a apresentação das soluções de montagem adotadas, o texto do presente capítulo será inicialmente dividido em seções correspondentes a cada um dos 4 blocos construtivos do *firmware* de controle, os quais serão: a estrutura geral do *firmware* de controle, o inversor de frequência, o sistema para condicionamento de sinais, plataforma microprocessada baseada à DSP TMS320LF2812 e o sistema de sensoriamento. Após a apresentação dos blocos do *firmware*, será mostrada a interface entre eles para se determinar a transdução entre um comando de corrente de conjugado no *software* do DSP e o conjugado eletromagnético que é aplicado ao eixo do motor. Tal transdução permitirá que a sintonia dos ganhos dos compensadores, feita em unidades do sistema internacional, seja corretamente aplicada ao *software* do DSP, onde tais ganhos são representados em unidades de Q22.

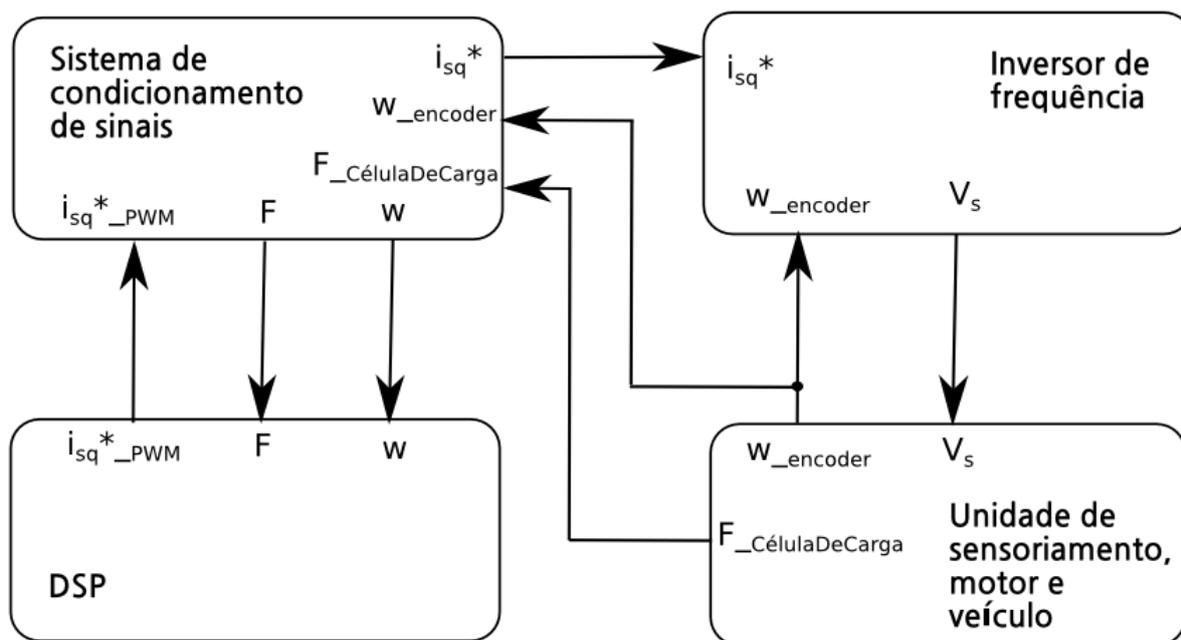


Figura 5.1: Estrutura geral destacando a interface de sinais entre os 4 principais sistemas de *firmware* do Vecarr.

5.1 Estrutura geral do *firmware* de controle

O *firmware* de controle proposto é dividido em 4 sistemas: unidade de sensoriamento, unidade de condicionamento de sinais, plataforma microprocessada baseada à DSP TMS320LF2812 e inversor de frequência dotado de controle vetorial. A ilustração desses sistemas e a interface de sinais entre os mesmos é apresentada na Figura 5.1.

A topologia apresentada na Figura 5.1 foi sintetizada partindo do conceito de blocos construtivos, no qual a premissa de projeto foi utilizar, ao máximo possível, equipamentos já disponíveis no mercado para desempenhar as funções demandadas pelo Vecarr. Sob essa premissa, apresenta-se nas próximas seções os detalhes de projeto de cada um dos 4 sistemas.

5.2 Inversor de frequência

A corrente nominal do inversor de frequência foi determinada na seção 3.3. Tal inversor poderia ser sintetizado através de módulos retificadores, banco de capacitores para barramento CC, IGBTs, placas de gate drivers, sondas de corrente por efeito Hall, condicionamento de sinais de medições e *firmware* de controle. Durante o desenvolvimento do projeto Vecarr essa tentativa foi implementada, mas o desempenho para o controle de conjugado não foi satisfatório. Isso ocorreu porque, em um sistema com variações dV/dt da ordem de $300V/\mu s$ por micro segundo, o ruído de modo comum acoplado por efeito capacitivo é significativo, e o mesmo circula pelo

sistema eletrônico de sinais, encontrando caminhos pela fiação da célula de carga e encoder. Como o controle é feito em plataforma digital, o ruído e todos demais sinais são amostrados em frequências próximas àquela do PWM, fazendo com que componentes espectrais típicas de tais sinais apareçam, por efeito aliasing, em baixas frequências. Tais sinais provocam offsets nos sinais de informação reais. Como o sistema de controle da máquina de indução opera em modo vetorial, tais distorções nas medidas de corrente provocam estimativas errôneas dos fluxos da máquina e, conseqüentemente, não é possível se alinhar corretamente os eixos dq de controle aos fluxos mencionados. Com esse problema, é impossível fazer o desacoplamento de componentes ortogonais de magnetização e de conjugado, levando-se a erros de controle. Tais erros, além de inviabilizarem a operação do Vecarr da maneira desejada, podem provocar a queima do motor. Baseado nos problemas técnicos mencionados, e tendo em vista que o desenvolvimento do inversor não se constitui em contribuição científica ao foco dessa tese, optou-se pela utilização de um inversor comercial já testado e livre de tais problemas. Essa ideia também é aplicada na indústria automobilística a qual já opta por sintetizar a solução veicular empregando-se, ao máximo possível, blocos construtivos já prontos, os quais estejam testados e consolidados.

Na sua interface com o sistema de controle, o inversor recebe sinais de referência de conjugado. Tal premissa se justifica pois o Vecarr deve permitir que o usuário imponha a velocidade do veículo e, para tal, o inversor deve ser configurado para operação em modo de regulação de conjugado. Nesse modo de operação, a referência de conjugado será aplicada por uma das entradas analógicas do inversor. Como o usuário pode movimentar o veículo para frente e para trás, o sinal de referência da corrente de conjugado deve ser bidirecional e o kit de desenvolvimento DSP disponível para o projeto só aplica comandos de referência como modulante de sinais PWM alocados entre os níveis 0 e 3,0V. Assim sendo, para garantir referências de conjugado bidirecionais para o inversor, foi aplicado um *offset* no *software* de controle do mesmo, de tal forma que o nível de 1,5V proveniente do DSP seja interpretado como comando de conjugado nulo.

Outro ponto relevante na escolha do inversor é a resolução de suas entradas analógicas. Essa questão é importante para garantir que o intervalo entre os níveis de força possíveis de serem reproduzidos pelo sistema não seja muito alto. Caso tal premissa não seja atendida, haverá degraus de aceleração de amplitude elevada entre níveis sucessivos de força, e tal comportamento seria percebido através de solavancos pelos usuários, tornando a dirigibilidade desagradável e perigosa. Ao mesmo tempo, uma baixa resolução, ou seja, uma alta diferença entre níveis de força possíveis de serem reproduzidos pelo acionamento, poderia levar a um nível mínimo muito

alto para a força aplicada pelo acionamento. Nessa situação, manobras em curtas distâncias seriam perigosas. Essa questão foi adequadamente considerada no projeto Vecarr ao se observar que a entrada analógica, a qual recebe a referência de conjugado, possui 12 bits de resolução. Considerando-se um bit para sinal de conjugado, restam 11 bits que caracterizam 2048 níveis de referência para corrente de conjugado. Pelo catálogo do inversor utilizado [20], tal entrada analógica possui faixa de medição de 0 a 10V, com fundo de escala igual a 200% do conjugado nominal do motor, ou seja, 200% de 6,125N.m. Portanto a resolução da referência de corrente de conjugado é de $200\% \times (6,125 \text{ N.m}) / (2048 \text{ níveis})$, ou seja, $5,98 \times 10^{-3} \text{ N.m/nível}$. Portanto, ao se considerar a razão de transmissão de 23,4, é possível uma resolução de conjugado no eixo da roda igual a 0,072 N.m/nível. Como o sistema é dimensionado para operar sem deslizar e o raio da roda é de 0,12m, tal nível de conjugado na roda produz uma resolução de força de 0,57N. Como parâmetro de comparação, essa resolução de força é aproximadamente igual ao peso de um pão francês e, portanto, é satisfatória às premissas do projeto.

5.3 Plataforma microprocessada baseada à DSP de ponto fixo da família TMS320LF2812

O sistema de controle do veículo foi embarcado em um kit de desenvolvimento baseado no microprocessador DSP TMS320LF2812. A escolha de tal microprocessador se deu principalmente pelas características apresentadas a seguir:

- disponibilidade do kit de desenvolvimento nos laboratórios onde o trabalho foi conduzido. Tal característica acelerou o desenvolvimento do trabalho pelo conhecimento já disponível pela equipe e pela presença de placas eletrônicas para proteção, interface e alimentação do DSP. Para o projeto Vecarr, utilizou-se a placa desenvolvida no Laboratório Tesla da UFMG, a qual foi originalmente concebida para utilização com o kit de desenvolvimento EZDSP TMSLF2407 no controle de um DVR trifásico. Essa utilização foi possível pois avaliou-se que o kit de desenvolvimento EZDSP TMSLF2812, aplicado nessa tese, é compatível pino a pino com a referida família 2407;
- suporte no desenvolvimento de código através da biblioteca IQMATH que permite a emulação de operação em ponto flutuante através do DSP que é baseado a ponto fixo. Tal funcionalidade acelera consideravelmente o desenvolvimento do código e principalmente a depuração do sistema de controle;



Figura 5.2: Fluxograma do *software* de controle implementado na plataforma DSP. A sequência de eventos é executada a cada interrupção de *hardware* gerada pela unidade de geração de PWM.

- possibilidade para representação de variáveis em 32 bits. Tal característica viabilizou o projeto dos filtros digitais, uma vez que os mesmos demandaram para sua implementação coeficientes da ordem de 10^{-7} e, considerando um número aproximado de 3 bits para cada dígito decimal, verifica-se que tais coeficientes não seriam possíveis de se representar em uma única palavra de sistemas com representação em 16 bits. A ordem de grandeza de tais coeficientes se deu pela necessidade de se amostrar sinais com frequências da ordem de 10^3Hz e reter as informações da ordem de 10^0Hz , a qual é compatível com a dinâmica da força humana imposta ao veículo. Para filtros passa-baixa cuja frequência de corte é muito menor que a frequência de amostragem, há a necessidade de coeficientes com amplitude muito baixa para a implementação da equação à diferenças.

O fluxograma da lógica desenvolvida para o *software* de controle é apresentada no diagrama de blocos da Figura 5.2.

As variáveis de *software* empregadas no diagrama de blocos da Figura 5.2 são representadas em Q.22, ou seja, 1 bit de sinal, 9 bits para representação da parte inteira do número e 22 bits de parte decimal. Essa opção foi feita para otimizar demandas contraditórias de representação numérica - por um lado, enquanto os baixos valores dos coeficientes dos filtros digitais passa-

baixas demandam representações numéricas com mais casas decimais, os sinais de medição de sensores são melhor representados com mais dígitos na parte inteira. Após o projeto dos filtros e a avaliação das faixas demandadas para as variáveis de medição, optou-se pela representação Q.22.

Para números em Q.22, a faixa de valores representáveis é compreendida entre -512,0 a +511,999999. Como tais números são emulados como valores em ponto flutuante na biblioteca IQMATH, foram escolhidas unidades para as variáveis de controle do programa que se situam na faixa mostrada. Assim sendo, a força aplicada pelo operador é tratada no programa em kgf, pois valores em Newton demandariam representações da ordem de 10^2 para representação de forças de maior amplitude. Se a pessoa aplicasse a barra um esforço similar ao içamento de um saco de cimento, por exemplo, haveria a demanda pela representação de 550N, a qual é impossível de se representar em Q.22. Da mesma forma, para um motor de 4 pólos cuja redutora compatibiliza a sua velocidade nominal com a velocidade típica de translação de uma pessoa, haveria demanda para representação do sinal de velocidade de 1800rpm, o qual está fora da faixa de representação em Q.22 e, portanto, optou-se por representar a velocidade em por cento, sendo 100% ou 100 em Q.22 igual a 1800rpm. Já a corrente nominal do motor é de 3,4A, sendo que o motor opera com no máximo 150% desse valor nominal, ou seja, 5,1A. Assim sendo, a representação da corrente elétrica no motor é feita diretamente em Ampères.

O filtro digital aplicado à medição de corrente é do tipo Butterworth, IIR, passa-baixas, com frequência de amostragem de 2kHz e banda passante de 20Hz. Para tais características, o filtro deve possuir ordem 8 e os coeficientes do filtro possuem elementos com ordem de grandeza de 10^{-7} . Considerando uma aproximação de 3 bits para cada dígito decimal, um número decimal aproximadamente igual a 10^{-7} demanda 21 bits de resolução. Tal representação iria reter somente o primeiro dígito decimal não nulo do coeficiente, o que levaria a erros propagados na execução do código de controle. Para melhorar a resolução dos coeficientes, o filtro IIR de 8ª ordem foi dividido em 4 seções de 2ª ordem. Tal opção levou ao projeto do filtro com coeficientes de menor valor absoluto e da ordem de 10^{-5} , os quais podem ser representados com 5 dígitos decimais não nulos na representação Q.22 e reduzem, portanto, a propagação de erros numéricos na operação do sistema. A estrutura de cada seção de 2ª ordem é apresentada na Figura 5.3 e os coeficientes projetados para os filtros dos sinais de força e velocidade são apresentados na Tabela 5.3.

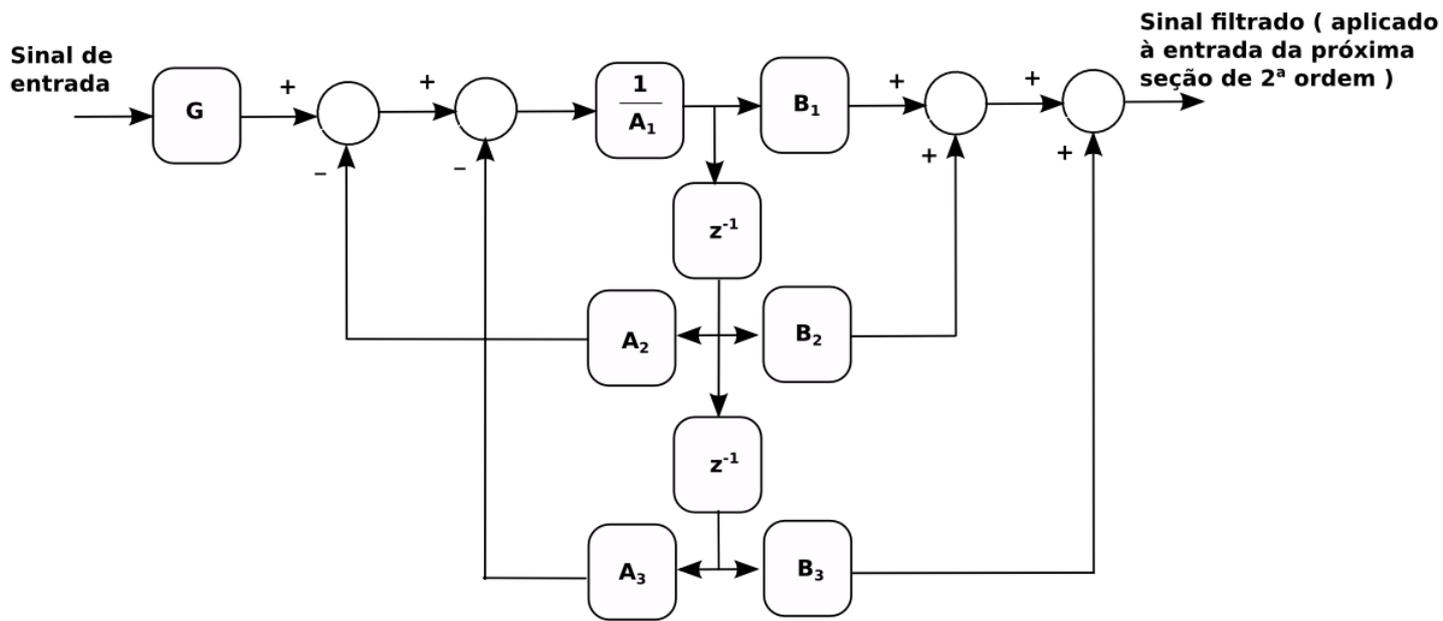


Figura 5.3: Estrutura de cada seção de 2ª ordem utilizada na implementação dos filtros digitais.

Tabela 5.1: Coeficientes dos filtros digitais aplicados às medições de força e velocidade. Esse filtro é do tipo Butterworth, passa-baixas, 8ª ordem, banda passante igual a 5Hz, frequência da banda de transição igual a 20Hz, atenuação de 1dB na frequência de corte e de 80dB no final da banda de transição.

Seção	Coefficiente	Valor do coeficiente	Seção	Coefficiente	Valor do coeficiente
1	A ₁	1	3	A ₁	1
1	A ₂	-1,967099	3	A ₂	-1,961374
1	A ₃	0,967488	3	A ₃	0,961761
1	B ₁	1	3	B ₁	1
1	B ₂	2	3	B ₂	2
1	B ₃	1	3	B ₃	1
1	G	0,000097	3	G	0,000161
2	A ₁	1	4	A ₁	1
2	A ₂	-1,991882	4	A ₂	-1,977767
2	A ₃	0,992275	4	A ₃	0,978158
2	B ₁	1	4	B ₁	1
2	B ₂	2	4	B ₂	2
2	B ₃	1	4	B ₃	1
2	G	0,000059	4	G	0,000097

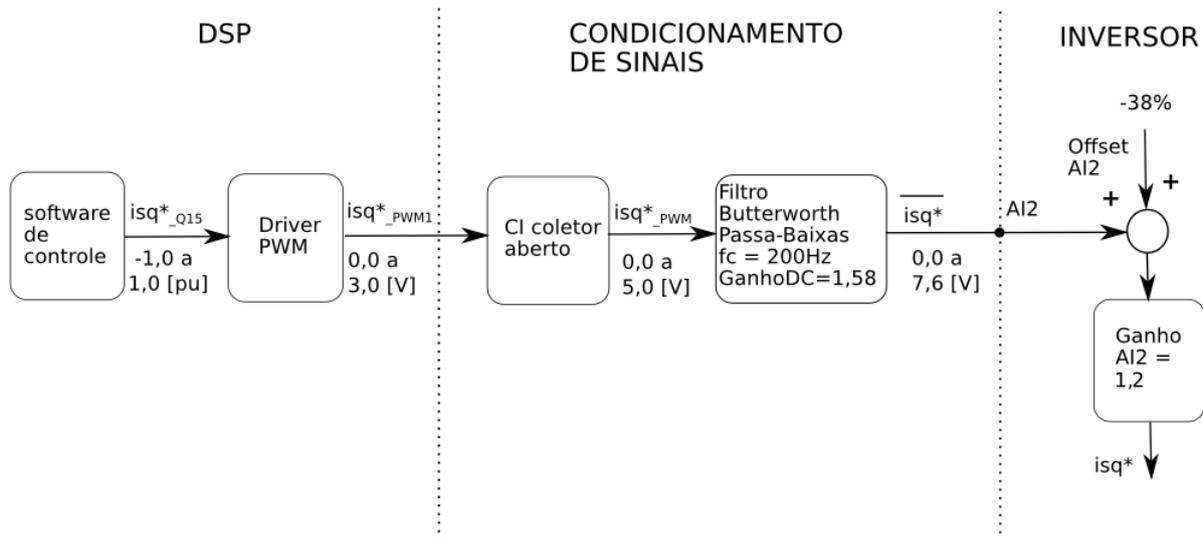


Figura 5.4: Diagrama de interface entre o DSP e o inversor, destacando o condicionamento do sinal de referência da corrente de conjugado.

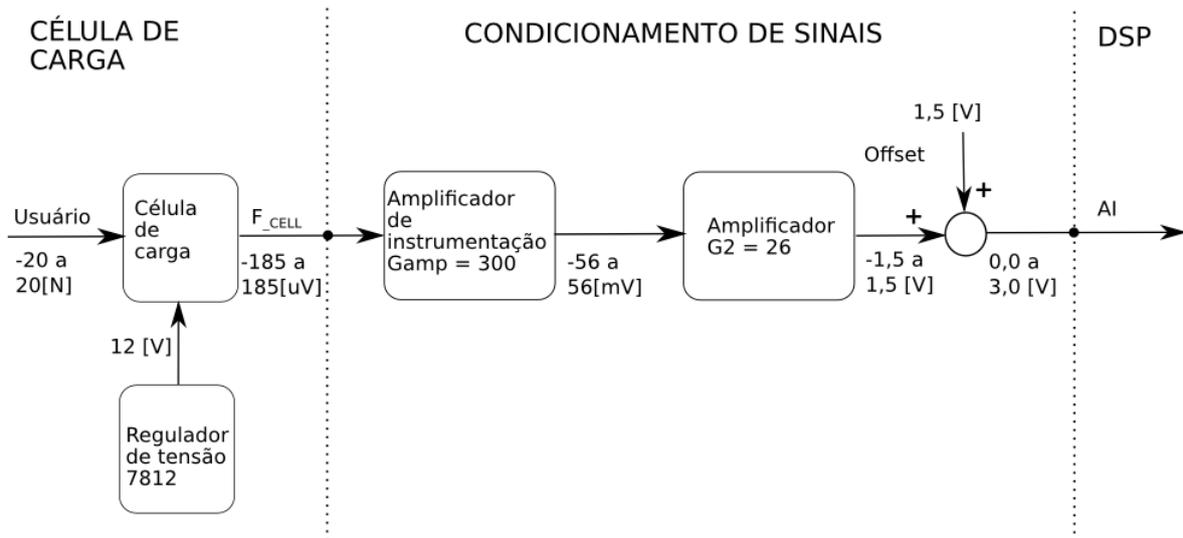


Figura 5.5: Diagrama de interface entre a célula de carga e o DSP.

5.4 Unidade de condicionamento para interface de sinais

A unidade de condicionamento é constituída por sistemas eletrônicos que compatibilizam os níveis de sinais entre inversor, DSP e sensores. As figuras 5.4 e 5.5 mostram, por diagrama de blocos, os níveis de tensão e o fluxo de sinais entre o DSP e o inversor, bem como entre os sensores e o DSP.

O sinal proveniente da célula de carga é adquirido de ponte de Wheatstone e portanto seu nível de referência não é igual à referência do sistema eletrônico. Para condicionamento desse sinal, é utilizado um amplificador de instrumentação com ganho 17V/V e um segundo estágio de amplificação não inversor com ganho de 20V/V . Para reduzir problemas relacionados

à comportamento não ideais dos amplificadores operacionais, foram empregados elementos da família TL082, os quais possuem entrada de alta impedância.

O encoder possui condicionamento interno de sinais através de uma estrutura chamada *differential line driver* e a mesma opera como fonte de corrente para transmissão dos pulsos. Tal opção reduz o acoplamento de ruídos e a consequente distorção do sinal para trajetos extensos entre o motor e o sistema de condicionamento. Para a utilização do differential line driver é necessário se instalar um resistor para conversão do sinal de corrente em tensão no ponto de acoplamento do cabo de encoder com o sistema de condicionamento. O valor dessa resistência é escolhido de acordo com a tensão esperada na entrada analógica do DSP.

O kit de desenvolvimento disponível no projeto não possui conversor DA. Assim sendo, para aplicar a referência analógica da corrente de conjugado (i_{sq}) do DSP para o inversor, foi utilizada uma saída PWM do DSP, a qual foi modulada com o valor de referência desejado, e o mesmo foi filtrado na unidade de condicionamento de sinais através de um filtro passa-baixas Butterworth de 2ª ordem, implementado na topologia de Sallem Key, a qual é apresentada por Boaventura e Seixas [11]. Tal filtro foi configurado com frequência de corte igual a 300Hz para garantir a banda passante demandada para referências de conjugado, tal como apresentado no projeto dos sistemas de controle desenvolvidos no capítulo 4. Ao mesmo tempo, como a frequência do sinal de PWM oriunda do DSP é de 2kHz, a frequência de corte de 200Hz adotada para o filtro é suficiente para atenuar as componentes espectrais resultantes da modulação PWM.

Tendo os seus respectivos comportamentos descritos nas últimas unidades, apresenta-se na Figura 5.6 a fotografia dos sistemas da plataforma microprocessada baseada a DSP, placa de condicionamento e inversor de frequência.

Convém destacar que o sistema eletrônico mostrado na Figura 5.6 é aplicável em qualquer outro robô/veículo elétrico de potência compatível ao Vecarr, salvo diferentes ganhos de amplificação demandados por sensores que tal veículo possa ter. Essa afirmação é baseada na opção de se dividir o *software* do controlador entre o DSP e o inversor, de tal forma que o último fique responsável somente pela regulação de conjugado eletromagnético. Como tal conjugado é proporcional à aceleração angular, e a velocidade e posição são dinamicamente acopladas à aceleração, o controle de conjugado permite regular qualquer trajetória mecânica no veículo. Tais comandos de trajetória podem ser gerados no DSP segundo a demanda da aplicação. Portanto, outras pesquisas e produtos que demandem a aplicação de um veículo elétrico podem usar o mesmo *hardware* de potência e sinais do Vecarr, havendo necessidade apenas de se alterar o *software* de controle no DSP.

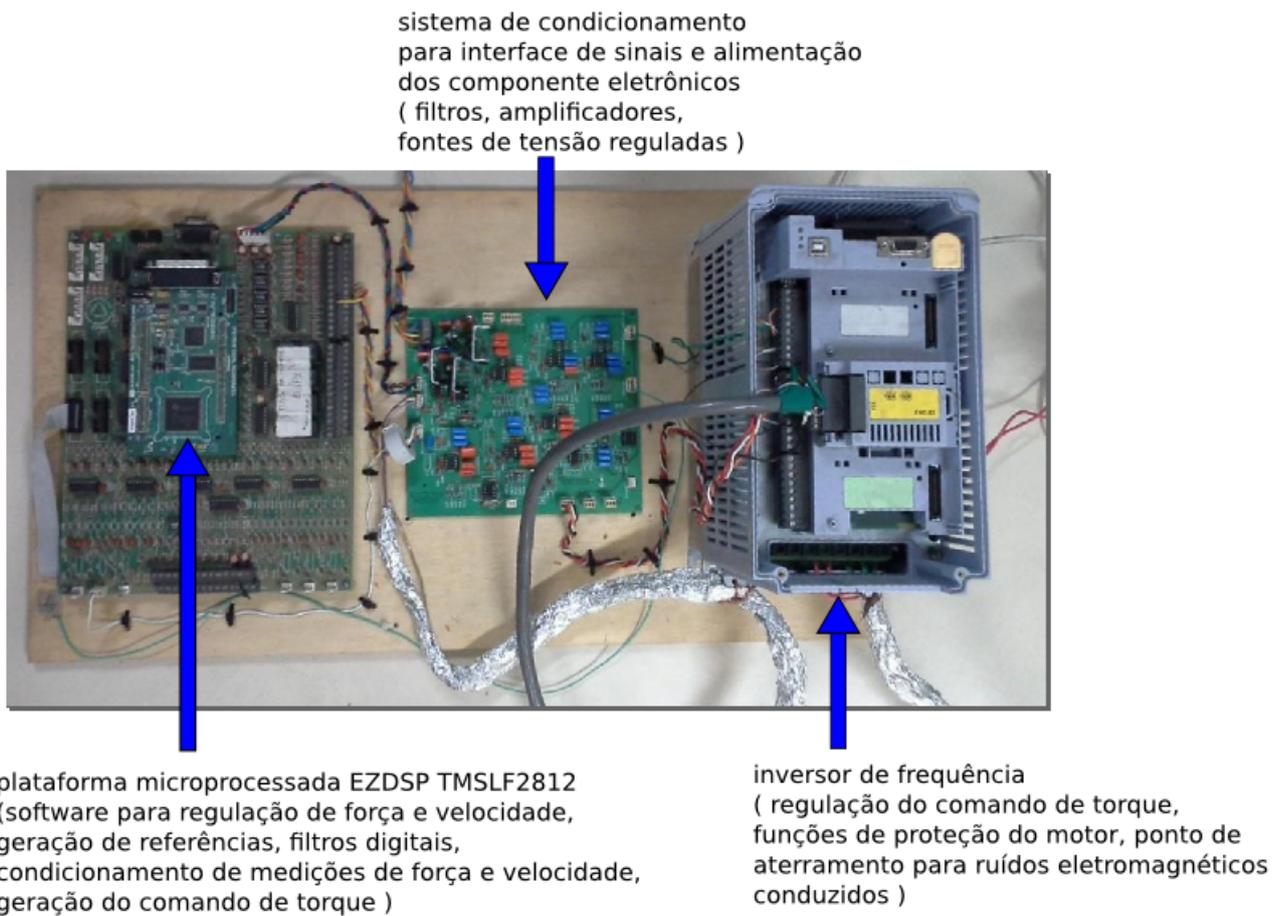


Figura 5.6: Fotografia dos sistemas microprocessado, de condicionamento e inversor de frequência.

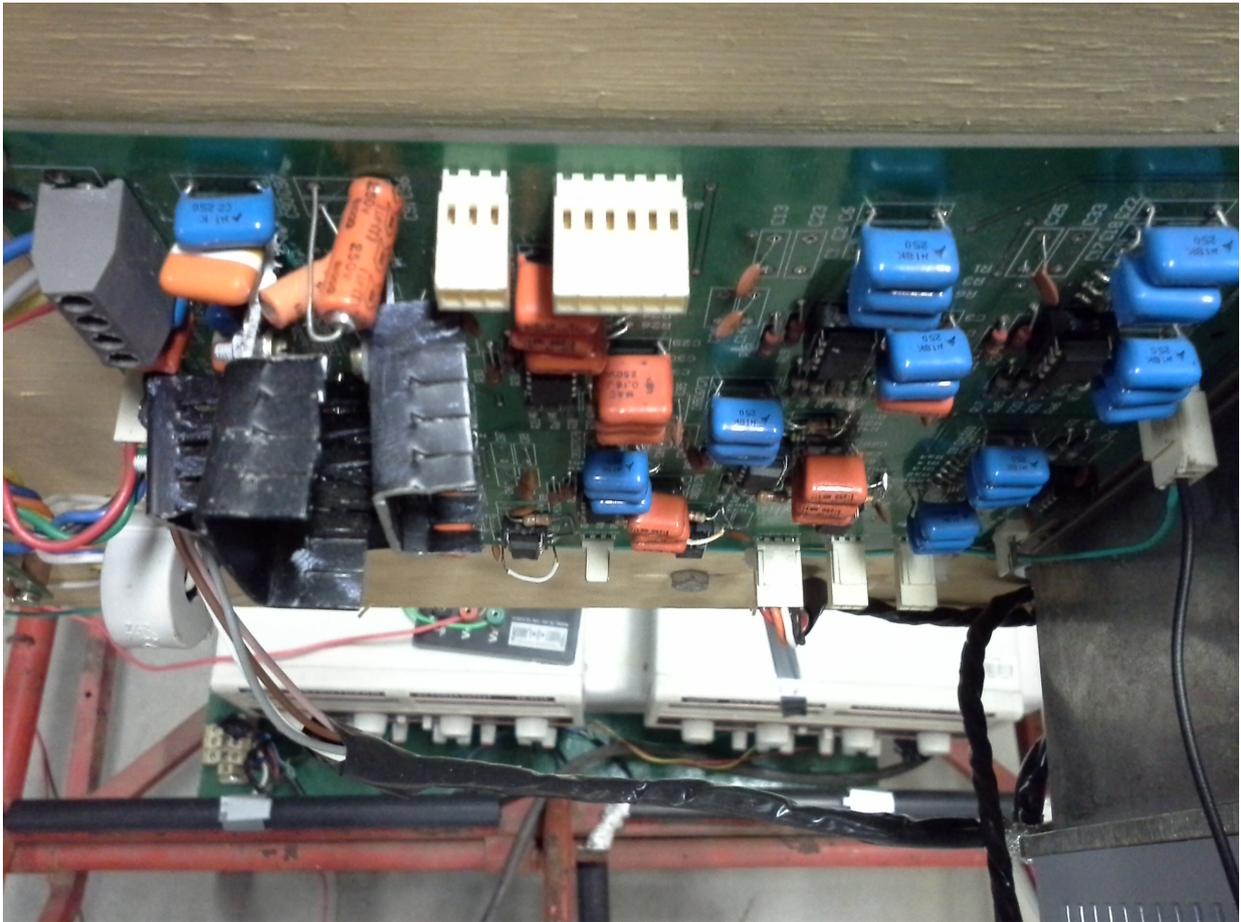


Figura 5.7: Fotografia das placas eletrônicas com destaque aos conectores utilizados no *hardware* do Vecarr para mitigar problemas de mau contato pelas vibrações mecânicas.

Outra questão tecnológica contemplada no projeto do *hardware* do Vecarr são as intensas vibrações mecânicas às quais o veículo será submetido quando estiver em operação. Por questões de custo, o veículo não possui sistema de suspensão dedicado fora o seu próprio pneu. Para garantir que os cabos de interface de sinais não sejam desconectados das placas, todas as interfaces de sinais são feitas por conectores AKJ, Molex ou parafuso, tal como destacado na fotografia da Figura 5.7.

Um ponto crítico para o início de operação do veículo foi a presença de ruídos irradiados e conduzidos fluindo entre os elementos de potência e de sinal do veículo. Pela relevância do problema e pelo tempo gasto para a sua detecção, apresenta-se na próxima seção a descrição e solução implementada para o mesmo.

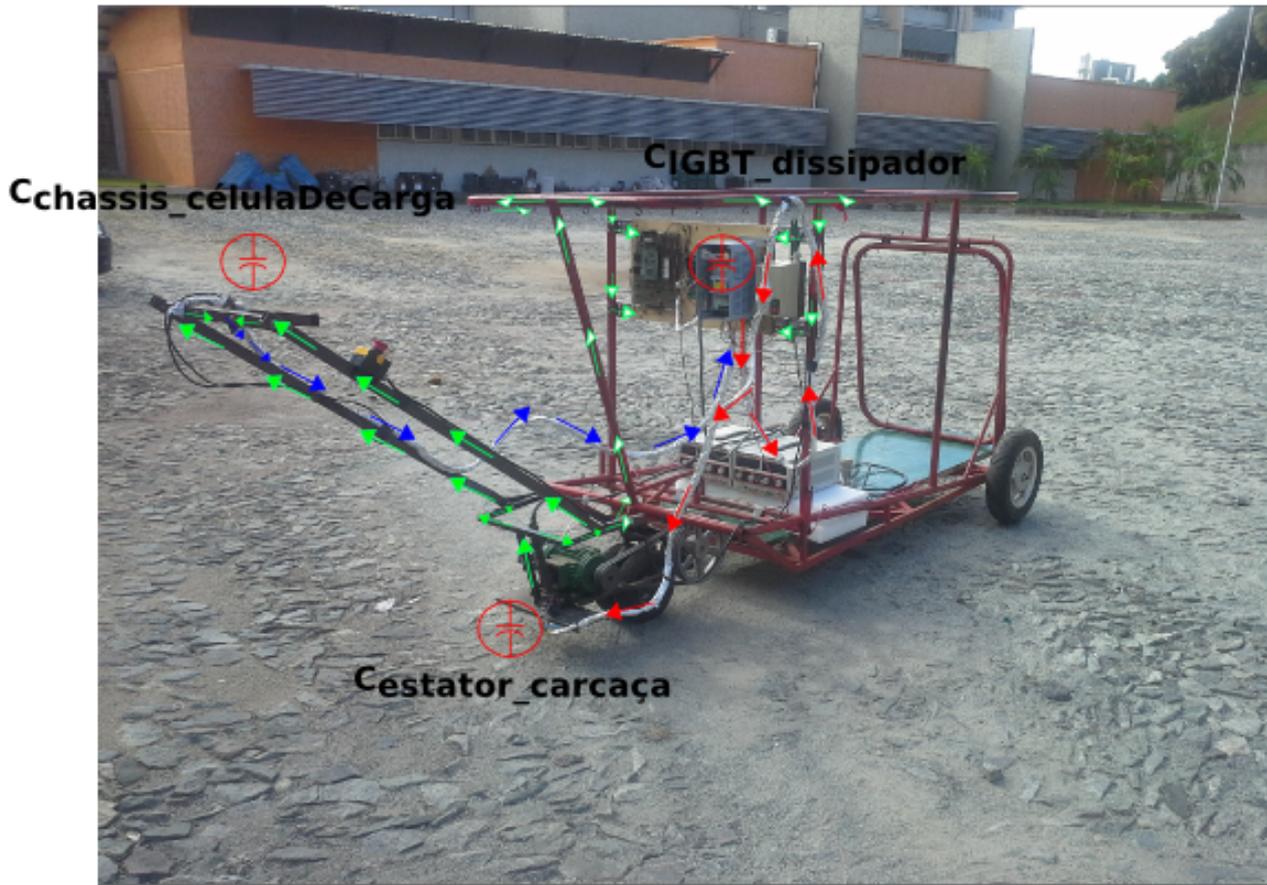
5.5 Soluções para atenuação dos ruídos no Vecarr

Como apresentado nas considerações sobre o inversor de frequência, o chaveamento dos IGBT's produz sinais com $300V/\mu s$ de taxa de variação. Tais sinais são aplicados aos condutores

de cobre do motor e, devido ao capacitor constituído entre tais condutores e a carcaça da máquina, há a circulação de corrente capacitiva entre eles. A carcaça é apoiada ao chassis do veículo, o chassis é conectado ao guidão e o guidão à célula de carga, sendo todas essas conexões sem isolamento elétrico. Na célula de carga, bem como no encoder, há isolamento elétrico, mas com peças de dimensões reduzidas. Tal configuração geométrica favorece o aumento da capacitância equivalente dos sensores. Dessa forma, a alta taxa de variação na comutação dos IGBTs produz um ruído conduzido de modo comum que circula dos IGBTs para os cabos de estator, seguindo pela carcaça do motor. Da carcaça ele pode ser acoplado a dois caminhos diferentes: um deles passando pelos cabos do encoder e retornando ao inversor; e outro caminho passando da carcaça para o chassis, guidão, célula de carga, cabeamento da célula de carga, placa para condicionamento de sinais. A partir do sistema de condicionamento, o ruído pode ser acoplado pelas trilhas da placa ao sinal de comando de torque que é aplicado ao inversor, onde então ele retorna aos IGBTs. Tal ruído inviabiliza a operação satisfatória do sistema pois, ao se amostrar os sinais da célula de carga no conversor A/D do DSP, há sinal em corrente alternada de baixa frequência sobreposto ao sinal de força, o qual é oriundo de efeito *aliasing* das componentes espectrais analógicas com frequências próximas ao chaveamento do conversor. A análise dos possíveis caminhos do ruído conduzido de modo comum é apresentado na Figura 5.8.

A análise da Figura 5.8 mostra que, independente dos caminhos paralelos em que o ruído conduzido de modo comum possa circular, o mesmo sempre circula pelos cabos de alimentação do estator e retorna pelos cabos de encoder, da célula de carga ou pela estrutura metálica do veículo. Como não é possível inibir a fonte de ruído de modo comum, uma vez que os IGBTs serão comutados para síntese dos sinais PWM, optou-se por criar um caminho de baixa impedância ao ruído antes que o mesmo seja acoplado ao sistema de condicionamento de sinais. Tal caminho não pode ter contato elétrico com os cabos de estator e, portanto, o seu acoplamento aos cabos de potência será capacitivo. Como o estabelecimento da capacitância demanda dois elementos condutores isolados por um dielétrico, e tal capacitância aumenta com a área dos condutores, foi aplicado um envólucro de papel alumínio em torno dos cabos trançados de estator.

Tal opção faz com que o ruído tenha um caminho de mais baixa impedância para retorno aos IGBTs do que o circuito contendo os acoplamentos capacitivos do motor para o chassis, e em série a ele o acoplamento do chassis para os sensores e eletrônica, então retornando da eletrônica para os IGBTs. Na extremidade dos cabos do lado do inversor, a cobertura em papel



- Corrente entre os IGBTs e o estator do motor
- Corrente entre célula de carga e placa de condicionamento
- Corrente entre carcaça do motor e célula de carga
- Corrente entre a carcaça do motor e o dissipador do inversor

Figura 5.8: Alguns caminhos para o ruído conduzido de modo comum.

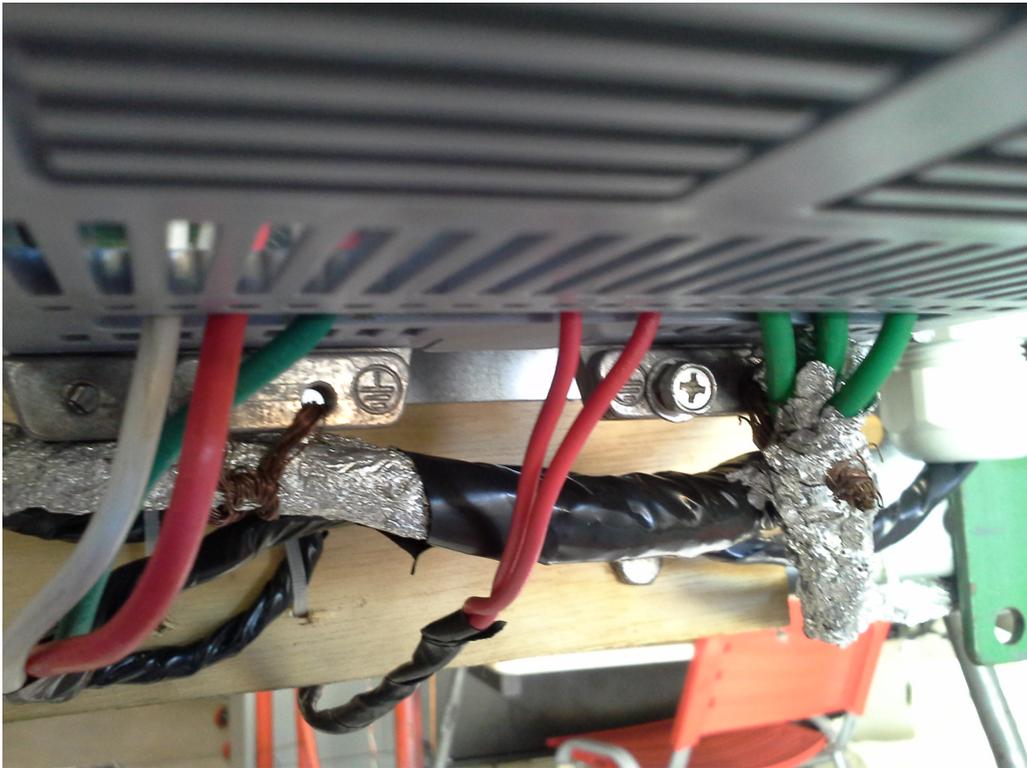


Figura 5.9: Aterramento dos envólucros de papel alumínio dos cabos de alimentação e da célula de carga ao dissipador do inversor.

alumínio foi conectada à estrutura do dissipador. Essa conexão favorece o retorno do ruído ao IGBT que o produziu, uma vez que há uma capacitância de valor elevado entre o dissipador e o encapsulamento dos IGBTs, dado que esses elementos são isolados somente por uma camada de baixa espessura de pasta térmica. A solução mencionada é mostrada na fotografia da Figura 5.9.

Além da conexão ao dissipador do inversor do envólucro de alumínio dos cabos de estator, foi feita a conexão de tal envólucro ao chassis do veículo, de tal forma que a parcela do ruído que não retornou aos IGBTs na extensão do cabo de alimentação de estator encontre um caminho de baixa impedância para retorno pelo papel alumínio e não pelos sensores. Também destaca-se que o feixe de cabos da célula de carga também foi envolvido por papel alumínio e tal envólucro também foi conectado ao dissipador do inversor, tal como mostrado na fotografia da Figura 5.9. Essa opção foi feita para que o ruído de modo comum tenha no papel alumínio envolvendo o feixe de cabos um caminho de mais baixa impedância para retorno à sua fonte - os IGBTs - do que aquele apresentado pelos cabos de alimentação e sinais da célula e os respectivos elementos eletrônicos que processam tais sinais.

Destaca-se também que o encoder produz sinais de alto dV/dt . Porém para tal sensor foi utilizado um cabo blindado apropriado onde cada cabo de sinal em seu interior possui uma blindagem metálica. Todas as blindagens dos respectivos cabos de sinais são aterradas entre

si e tal aterramento é também ligado ao dissipador do inversor, de tal forma que os ruídos conduzidos produzidos pelo trem de pulsos quadrados do encoder tenham um caminho de baixa impedância para retorno à sua fonte sem circular pelos demais elementos eletrônicos do sistema.

Além do ruído conduzido de modo comum, observou-se por osciloscópio a presença de componentes de 60Hz em alguns pontos do circuito eletrônico que não estavam diretamente conectados à rede de energia da concessionária e, portanto, configuravam ruído acoplado nessa frequência.

Para solucionar os problemas de ruídos acoplados, foram trançados os seguintes cabos do sistema:

- Os três cabos de alimentação entre o inversor e o motor;
- Os quatro cabos (+Vcc, GND, sinal + e sinal -) de conexão da célula de carga ao sistema de condicionamento de sinais;
- Os quatro cabos de alimentação (+15V, -15V, +5V, GND) da fonte regulada para o sistema de condicionamento e placa de desenvolvimento do DSP;
- os dois cabos de conexão (i_{sq} * e GND) do sistema de condicionamento de sinais para o inversor;

O conjunto de cabos trançados apresentados foram enrolados em um núcleo toroidal de material ferromagnético, de tal forma a se constituir um filtro indutivo para os ruídos de modo comum.

A implementação dessas duas soluções - trançamento de cabos para redução da área de acoplamento de fluxo magnético e aplicação de núcleo toroidal de ferrite para os cabos trançados - eliminou os problemas de *offset* de baixa frequência sobrepostos aos sinais dos sensores.

De qualquer forma ainda se verificou ruído na frequência de chaveamento do inversor e *offset* DC ao sinais digitais recebidos pelo *software* de controle. O *offset* DC é compensado em *software* e o ruído apresentou amplitude aproximada de 20 níveis na representação numérica de 12 bits disponível na saída do conversor A/D do DSP. Assim sendo, antes de ser aplicado à entrada do controlador, o sinal do ruído foi filtrado digitalmente através de um filtro Butterworth passa-baixa com frequência de corte igual a 20Hz. Tal frequência de corte não atenua a amplitude do sinal de força imposto por pessoas, uma vez que o mesmo possui banda passante de 3,5Hz, bem como produz pouca defasagem a tais sinais.

Mediante as soluções apresentadas nessa seção, obteve-se uma relação sinal/ruído satisfatória para os sinais de entrada do sistema de controle, ou seja, os sinais da célula de carga e do encoder. Para o sinal da célula de carga já amostrado pelo DSP, o ruído sobreposto possui amplitude típica igual a 0,8kgf. Considerando que o fundo de escala para representação da força humana é de 512,0kg, que 0,8kgf é inferior ao peso de um saco de sal com massa de 1,0kg e que os seres humanos aplicam forças tipicamente maiores que esse valor (vide Capítulo 4), conclui-se que a relação sinal/ruído que inibe a distinção entre forças menores que 0,8kgf de ruídos é plenamente satisfatória. Além disso o sinal de velocidade possui um ruído sobreposto igual a 15rpm. Essa relação sinal/ruído inibe o controle de velocidades angulares menores que 0,64rpm no eixo da roda ou velocidades de translação menores 6,6cm/s. Portanto, a relação sinal/ruído alcançada para o sinal de velocidade também é plenamente satisfatória para a maior parte das atividades de translação desenvolvidas pelo Vecarr.

5.6 Unidade de sensoriamento

A unidade de sensoriamento é composta por um encoder de 1024ppr e uma célula de carga especificada em 130kgf.

A célula de carga é instalada entre o veículo e a barra de contato, alocada aproximadamente no meio da barra de contato, tal como mostrado na Figura 5.10. Assim sendo, ela recebe esforços simultâneos dos braços direito e esquerdo da mão do usuário. Tais esforços não são iguais e como a detecção de força é feita pela deformação da estrutura da célula, a escolha de tal sensor deve ser feita considerando um arranjo que compense esforços não simétricos dos dois braços. Dessa maneira, há a garantia que o sistema irá se mover no sentido correto se o usuário aplicar uma mesma força com a mão direita ou esquerda. Sob essas considerações, foi aplicada ao Vecarr uma célula de carga modelo Schenck RTB 130kg, a qual possui compensação de esforços torsionais.

Para a ponte de Wheatstone presente na célula de carga, se for aplicada uma dada força, a tensão de saída do sistema pode ser aumentada com o aumento da tensão de alimentação. Essa opção aumenta a sensibilidade do sensor, o que é conveniente pela baixa amplitude do sinal detectado. No caso da célula aplicada ao Vecarr, optou-se pela alimentação em 12V, a qual é a máxima tensão nominal permissível à célula. Para a operação com o sistema embarcado ao veículo, a fonte primária de potência será o banco de baterias, o qual possui tensão decrescente durante os percursos de trabalho. Para compensar esse efeito, a tensão de alimentação da célula será obtida de um regulador de tensão modelo 7812.

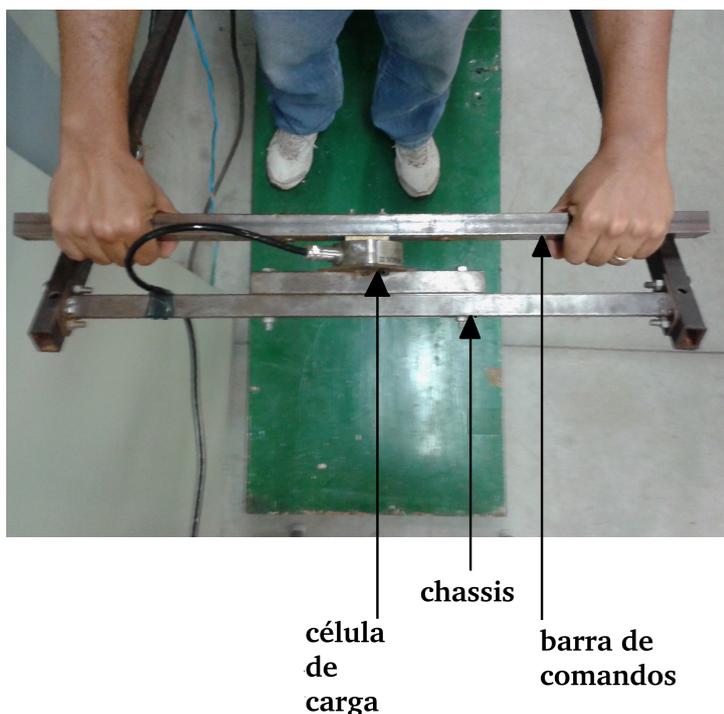


Figura 5.10: Montagem da célula de carga para operação com o Vecarr.

A célula de carga aplicada possui capacidade nominal de força de 130kgf, a qual é maior que os esforços típicos da ordem de 10^1 kgf aplicados por pessoas. Para evitar problemas de controle pela não-linearidade do sensor, o mesmo foi testado em conjunto com a sua unidade de condicionamento. Nessa pesquisa, alteres de massa calibrada foram aplicados à compressão e tração da célula. Observou-se no experimento que a célula possui linearidade satisfatória, podendo então ser empregada ao sensoriamento dos níveis de força típicos aplicados por pessoas.

Para o sensoriamento de posição angular do eixo do motor e cálculo em *software* da respectiva velocidade angular foi utilizado um encoder de 1024ppr, modelo Dynapar 1024. Tal encoder fornece uma resolução de $0,35^\circ$ /pulso e considerando-se a relação de transmissão de 23,4, tal resolução referida ao eixo da roda é de $0,015^\circ$ /pulso. Como o raio da roda é de 0,12m, tal resolução referida ao movimento de translação na roda é de 1,8mm/pulso. Essa resolução é adequada para deslocamentos à alta velocidade ou mesmo para manobras finas do veículo. O condicionamento do sinal do encoder ocorre em uma unidade de *software* do DSP. Essa unidade trabalha em dois modos, as quais operam pela contagem do número de pulsos em uma base de tempo fixa ou pela contagem de tempo para o sistema atingir um número fixo de pulsos. O primeiro modo é adequado para medições de velocidades elevadas, uma vez que o erro relativo máximo de uma borda de subida ou descida fica reduzido quando várias bordas do trem de pulsos do encoder estão presentes em uma base fixa. Por outro lado, a contagem do tempo entre bordas do trem de pulso é adequada para baixas velocidades, uma vez que,

nesses cenários, o período do trem de pulsos pode ser maior que a largura da base de tempo fixa, o que resultaria na medição de velocidade nula mesmo com o veículo em deslocamento. Como o Vecarr opera em ampla faixa de velocidades, a medição de velocidade foi desenvolvida sob os dois modos mencionados, sendo que os mesmos são comutados pela amplitude do sinal de velocidade. Quando tal sinal representa velocidades maiores que 18rpm, a medição se faz pela contagem do número de pulsos em uma base de tempo fixa. Para velocidades menores que 18rpm, tal medição é implementada pela contagem do tempo para um número de pulsos fixos.

Quanto aos sensores, o último cuidado tomado foi trançar os cabos de alimentação e de sinal dos mesmos, bem como a inserção de um núcleo ferromagnético toroidal comum a todos os cabos já trançados. Os cabos trançados tem por objetivo reduzir a área para acoplamento de fluxo magnético e conseqüentemente reduzir o ruído irradiado, e o núcleo ferromagnético envolvendo todos os cabos trançados simultaneamente tem por objetivo criar uma indutância para o ruído de modo comum, uma vez que tal ruído possui igual amplitude em todos os cabos e é tipicamente caracterizado por conteúdo espectral de alta frequência.

5.7 Correlação entre os ganhos dos compensadores no sistema internacional de unidades para os ganhos em pu no *software* do DSP

Independente de qual estratégia de controle se escolha, sempre haverá na saída do *software* de controle do DSP um comando de corrente de conjugado o qual será regulado pelo inversor de frequência. Tal comando de corrente de conjugado - i_{sq} - será produzido em unidade Q.22, a qual foi escolhida para representação numérica no *software* do DSP. Dessa forma, não se pode aplicar diretamente os valores de ganhos obtidos para sintonia dos compensadores de cada controlador desenvolvido, uma vez que tais ganhos estão em unidades do sistema internacional. Assim sendo, será apresentada nessa seção a metodologia para correta correlação entre os ganhos no sistema internacional para os ganhos em unidades de pu do DSP.

Tal como projetado no capítulo 4, o ganho proporcional do compensador PID operante na estrutura para regulação de força constante possui valor igual a $2,8543 \cdot 10^{-4}$ A/N. Portanto, um erro de 1N deve levar a uma corrente de conjugado igual a $2,8543 \cdot 10^{-4}$ A, e o valor atribuído ao ganho proporcional no *software* do DSP deve garantir tal relação. Para obter o valor desse ganho, será destacado o ganho total de todos os blocos de *software* e de eletrônica existentes no

Tabela 5.2: Dados obtidos para ensaio de correlação $i_{sq}^* \times T_e$.

Compensador	Ganho em unidades SI	Ganho em unidades DSP	Regulador
K_{pf}	$2,8543 \times 10^{-4}$ A/N	$3,58293 \times 10^{-4}$ pu/kgf	Reg. Força Constante
K_{if}	$2,69 \times 10^{-5}$ A/(N.s)	$2,3767 \times 10^{-5}$ pu/(kgf.s)	Reg. Força Constante
K_{df}	$2,8419 \times 10^{-4}$ A/(N/s)	$3,5674 \times 10^{-4}$ pu/(kgf/s)	Reg. Força Constante
$K_{p\omega}$	4 A/(rad/s)	5,011 pu/(rad/s)	Imp. Mecânica Amigável
$K_{i\omega}$	65 A/(rad)	81,5 pu/(rad)	Imp. Mecânica Amigável

sistema de controle desde a entrada do erro de força no regulador proporcional até o comando de corrente do inversor onde, então, será calculado o valor do ganho proporcional em unidades do inversor. Para orientar essa tarefa, apresenta-se na Figura 5.11 o diagrama de blocos do sistema no intervalo de sinais mencionado. Tomando como premissa m comando de corrente de conjugado igual a $2,8543 \cdot 10^{-4}$ A no inversor, os valores de todos os sinais presentes entre os blocos foi calculado, do final do diagrama para o seu início. Tais ganhos são mostrados entre os blocos. Como tal comando de corrente de conjugado deve ser produzido com o erro de força igual a 1N, e o DSP representa forças em kgf, na entrada do compensador proporcional foi suposto um sinal igual a 0,1kgf. Pela relação entre os sinais na entrada e na saída do compensador proporcional foi calculado o ganho que deve ser atribuído ao mesmo no DSP.

Por conveniência foram considerados nulos os ganhos integral e derivativo do regulador de força constante para o exemplo mostrado na Figura 5.11. Para calcular a correlação desses ganhos, pode ser aplicado o mesmo processo exposto no diagrama. No caso do ganho integral, basta anular os outros dois ganhos e considerar um erro de força fixo igual a 1N e integrado durante um segundo, bem como o comando de corrente que tal integral de erro de força produziria. Para o ganho derivativo, basta considerar como premissa uma derivada instantânea do erro igual a 1N/s e o respectivo comando de corrente produzida por ela, tal como previsto no ganho projetado no capítulo 4. Dessas premissas e dos ganhos dos blocos procede-se ao cálculo dos sinais entre os mesmos, restando como incógnita o ganho do compensador derivativo em unidades pu/(kgf/s) do DSP.

Aplicando-se a metodologia descrita aos ganhos projetados para os dois reguladores projetados no capítulo 4, apresenta-se na Tabela 5.2 os ganhos que devem ser atribuídos às variáveis correspondentes aos compensadores das malhas de controle.

A caracterização de tal transdução será feita em duas partes. Na primeira parte, será feita a transdução do comando de corrente de conjugado do DSP para o conjugado real no eixo da máquina. Esse trabalho caracterizará quantos N.m por $pu_{Q,22,DSP}$ o sistema desenvolve. Através dessa caracterização, será feita a segunda da transdução, a qual determinará como

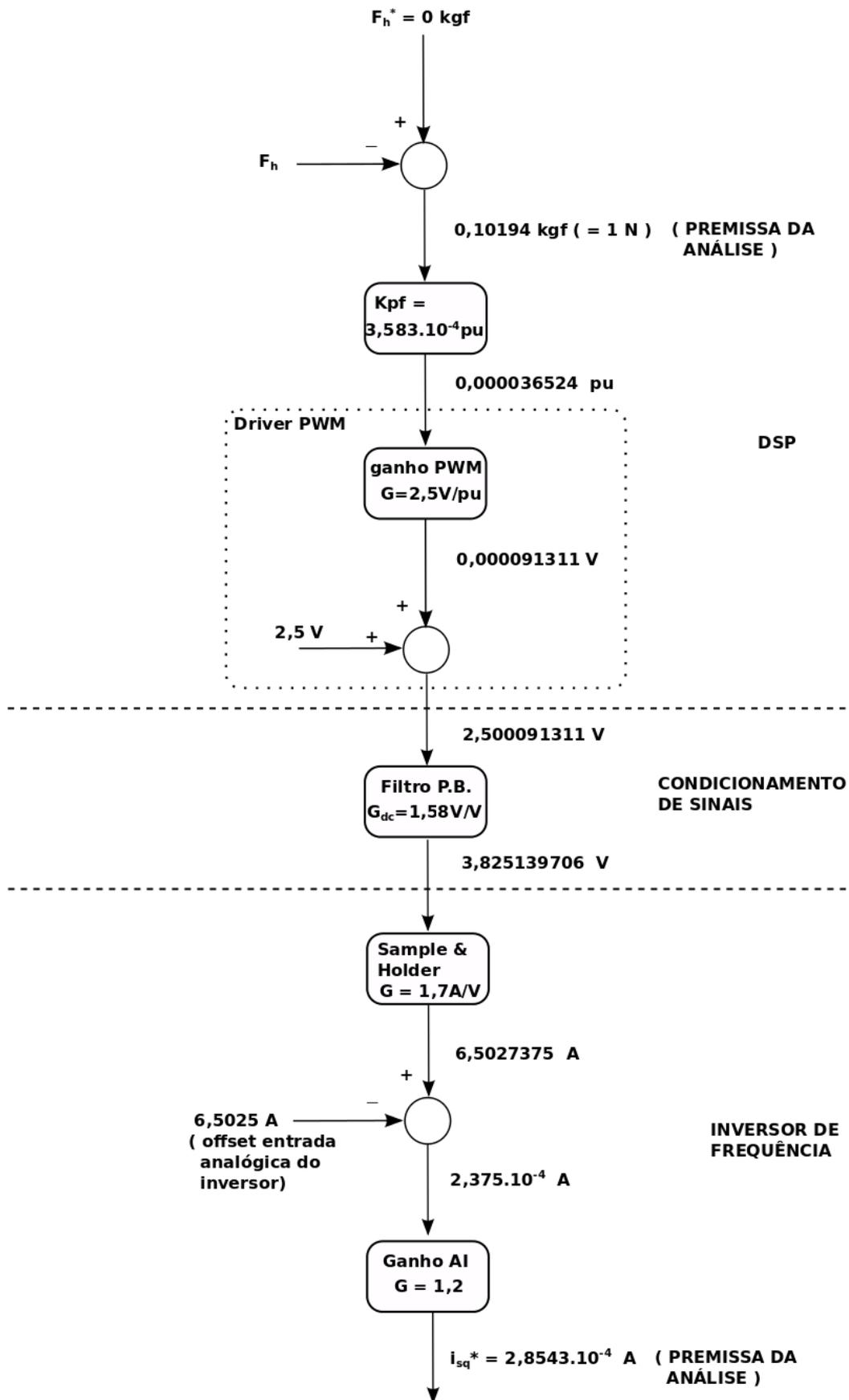


Figura 5.11: Exemplo de cálculo para correlação entre o ganho proporcional em unidades do DSP para as unidades do sistema internacional.

Tabela 5.3: Parâmetros do circuito equivalente para motor WEG Alto Rendimento 1,5cv, 220V, 4,43A, 1715rpm, 79,5%, fp 0,82.

Parâmetro	Valor
r_s	1,3395 Ω
r_r	1,6075 Ω
L_{Ls}	5,972 mH
L_{Lr}	5,972 mH
M	137,678 mH
r_{Fe}	281,144 Ω

correlacionar um ganho no comando de corrente de conjugado em Q22 para um ganho projetado no sistema internacional de unidades.

5.8 Transdução do comando de corrente de conjugado do DSP para o conjugado eletromagnético real

Para caracterizar quantos N.m de conjugado eletromagnético o motor desenvolve para cada 1,0 pu de comando de corrente de conjugado no *software* do DSP, o inversor foi configurado para operar em modo de controle de conjugado eletromagnético, sendo o comando de corrente de conjugado aplicado em uma de suas entradas analógicas. Tal comando foi imposto pelo DSP em malha aberta.

Foram aplicados vários comandos de corrente de conjugado. Para cada comando foram estimados os níveis de conjugado desenvolvidos no motor. Tal estimativa se deu através do circuito equivalente da máquina e das medições de tensão de estator, corrente de estator, frequência e velocidade desenvolvidas pelo motor.

Para aplicação desse método, é necessário conhecer o circuito equivalente da máquina elétrica em questão. Além disso, por restrições financeiras do projeto, não se encontrava disponível para os ensaios o motor de 0,5cv especificado no capítulo 2, sendo tal problema contornado utilizando-se um motor de 1,5cv disponível no laboratório. Por ensaios à vazio e de rotor bloqueado, foram obtidos os parâmetros apresentados na Tabela 5.3.

A partir dos parâmetros da Tabela 5.3 e da expressão do conjugado eletromagnético apresentada na equação 5.1 (Cardoso [17]), apresenta-se na Tabela 5.4 os valores obtidos para cada valor imposto para o comando de corrente de conjugado no DSP.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{Polos}{2} \cdot \frac{r_r}{s \cdot \omega_e} \cdot i_r^2 \quad (5.1)$$

Tabela 5.4: Dados obtidos para ensaio de correlação i_{sq}^* x T_e .

i_{sq}^* [pu]	Tensão [$V_{linha,pico}$]	Frequência [Hz]	Velocidade [rpm]	T_e [N.m]
0,0610	29,5	4,1	121,5	0,1825
0,0916	43,09	7,2	213	0,2932
0,1221	58,6	10,2	304	0,1949
0,1831	93,7	17,1	508	0,4664
0,2441	115,0	23,6	704	0,2839
0,3052	166,5	30,5	910	0,4478
0,4578	255,0	47,3	1413	0,5117

Fazendo-se a interpolação numérica entre os valores de comando de corrente e conjugado eletromagnético - i_{sq}^* e T_e - mostrados na Tabela 5.4, obtém-se a expressão entre tais grandezas tal como mostrado na equação 5.2.

$$T_e = 0,98.i_{sq}^* \quad (5.2)$$

Os comandos de corrente de conjugado - i_{sq}^* - não poderão exeder o valor de 1,0 pu no *software* de controle, uma vez que tais comandos serão aplicados do *software* para o inversor através de um driver periférico que cria um sinal PWM cujo valor da modulante será a própria corrente de conjugado. Tal driver só aceita valores menores ou igual a 1,0 pu. Assim sendo, quando houver o máximo comando de 1,0pu na corrente de conjugado, o conjugado máximo desenvolvido no motor será de 0,98N.m. Como a transmissão disponível para a montagem em questão possui relação 2,03 vezes maior que aquela projetada no capítulo 2, o motor irá desenvolver um conjugado máximo igual a 1,99N.m, o que é aproximadamente igual ao conjugado nominal do motor de 0,5cv também projetado no capítulo 2. Assim sendo, o motor disponível para ensaios disponibilizará no eixo da roda do veículo os mesmos níveis de conjugado máximo que seriam disponibilizados pelo motor de 0,5cv, 4 pólos projetado para operação do sistema.

5.9 Conclusões

Nesse capítulo foram apresentadas as principais unidades dedicadas ao processamento dos sinais elétricos presentes no Vecarr. Tais unidades foram escolhidas sob o conceito de blocos construtivos, onde buscou-se, ao máximo, aproveitar sistemas prontos e depurados para aplicação ao veículo.

Para a escolha do inversor de frequência foram avaliadas, além da capacidade nominal de corrente e tensão, a resolução no controle de conjugado, a presença do controle vetorial no

firmware embarcado e a capacidade de condicionamento do sinal analógico da referência de conjugado.

Para a especificação dos sensores utilizados, foram avaliados o fundo de escala, a resolução e a linearidade, bem como questões relacionadas à alimentação e condicionamento dos sinais. Tais grandezas foram correlacionadas às demandas operacionais do usuário e do veículo. Destaca-se o cuidado na escolha da célula de carga que compense esforços desiguais entre as mãos do usuário no contato com a barra de comando.

Mostrou-se as opções de projeto tomadas para a unidade de condicionamento de sinais, a qual faz a interface entre os sensores, o DSP e o inversor. Dentre essas opções, destaca-se a adequação de amplitude dos sinais e a filtragem do sinal PWM oriundo do DSP e que flui para o inversor. Tal filtragem suprimiu a ausência de conversor D/A no kit de desenvolvimento do DSP.

Para a plataforma de desenvolvimento baseada no DSP TMS320LF2812, apresentou-se a relação entre as variáveis amostradas pelo *software* de controle e a escolha da representação numérica para as mesmas. Foi também apresentada a solução de se dividir os filtros digitais em seções de 2ª ordem para conseguir, dentro da representação limitada das palavras no DSP, armazenar com baixo erro de arredondamento os coeficientes dos filtros digitais aplicados aos sinais de força e velocidade. Tal solução foi necessária uma vez que a frequência de corte dos respectivos filtros é muito menor que a frequência de amostragem. Mostrou-se também a opção de se configurar o driver para processamento dos pulsos do encoder através da contagem dos pulsos em uma base fixa de tempo para reduzir o erro na estimativa de velocidade de baixa amplitude, tal como ocorre com o veículo em diversas situações.

Com relação à compatibilidade eletromagnética, apresentou-se a análise do mecanismo de criação dos ruídos de modo comum, bem como dos caminhos para circulação do mesmo. Foram introduzidas então bobinas toroidais de núcleo ferromagnético nesses caminhos, atenuando-se tal ruído conduzido. Já os ruídos irradiados de 60Hz foram atenuados com o trançamento dos fios que continham os laços de maior área para acoplamento de fluxo magnético, tal como os cabos de alimentação do motor pelo inversor, os cabos de alimentação e sinais dos sensores, bem como os cabos de alimentação do circuito eletrônico pela fonte regulada.

Para determinar os limites operacionais do sistema mediante o *firmware* disponível, apresentou-se uma metodologia para correlação entre os comandos de conjugado do DSP e o conjugado eletromagnético real no eixo do motor. Além da determinação de limites operacionais, tal caracterização permite que outros controladores sejam testados com o mesmo sistema de po-

tência.

Finalmente mostrou-se uma metodologia para converter os ganhos projetados no sistema internacional de unidades para os ganhos em unidades pu do DSP. Tal metodologia é indispensável para que o sistema opere com o comportamento dinâmico adequado, tal que seja garantido ao ser humano a sensação amigável que se deseja, bem como se garanta a segurança de operação ao se compatibilizar a resposta do veículo ao comando das pernas de seu condutor. A metodologia apresentada é prontamente extrapolável a outros firmwares de controle empregados em plantas mecatrônicas.

Capítulo 6

Avaliação de Desempenho do Vecarr

Mediante as considerações apresentadas nos capítulos anteriores, onde foram contempladas as descrições de demanda dos usuários; a modelagem completa do veículo; o projeto dos controladores; a sintonia dos compensadores para rastreamento de trajetória, rejeição de carga e segurança; o projeto do *firmware* de sinais e dos elementos de potência e o projeto de compatibilidade eletromagnética, o veículo foi montado e seu desempenho avaliado dentro das premissas e condições de contorno expostas nas etapas de projeto. Tais resultados e análises de desempenho são apresentadas nesse capítulo.

6.1 Definição dos sentidos de deslocamento impostos para avaliação de desempenho do Vecarr

Em movimentos de translação há seis possibilidades de deslocamento para o Vecarr: em superfície não inclinada com deslocamento frontal ou reverso; em superfície inclinada com deslocamento frontal em aclone ou declive; em superfície inclinada com deslocamento reverso em aclone ou declive. O desempenho do Vecarr para todos esses movimentos será apurado nesse capítulo e, para tornar a leitura mais agradável e a compreensão do movimento mais rápida, apresentam-se nas figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6 as respectivas fotografias que caracterizam os movimentos frontal em superfície não inclinada, reverso em superfície não inclinada, frontal em aclone, reverso em aclone, frontal em declive e reverso em declive.



Figura 6.1: Caracterização do movimento em superfície não inclinada e sentido frontal.



Figura 6.2: Caracterização do movimento em superfície não inclinada e sentido reverso.

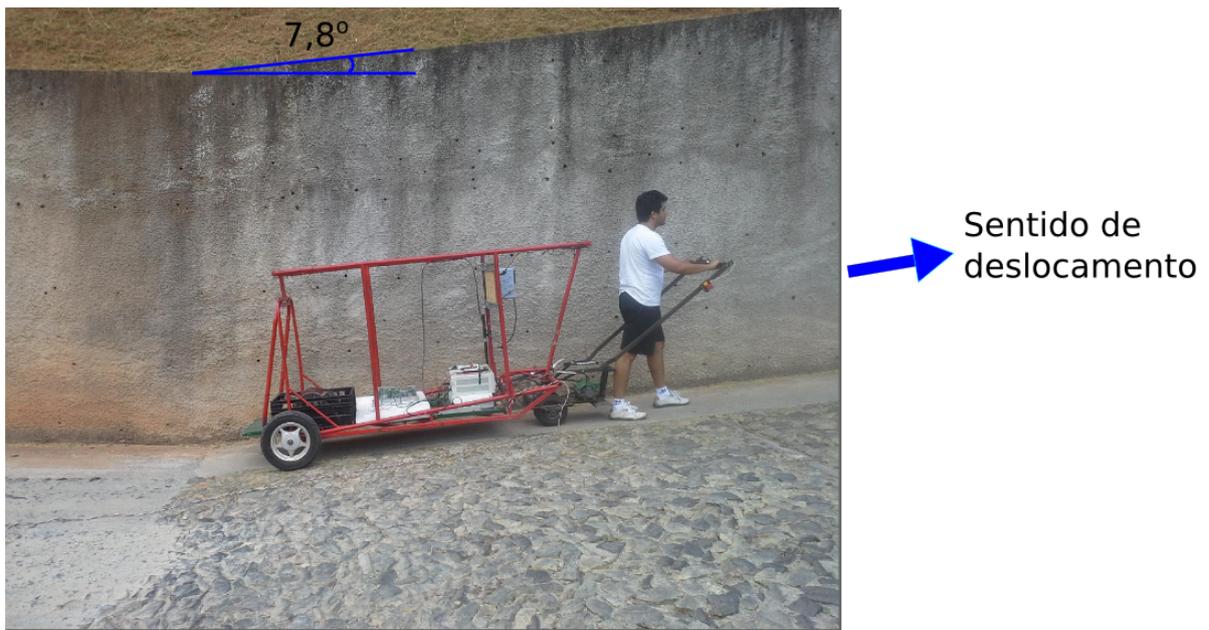


Figura 6.3: Caracterização do movimento em aclave e sentido frontal.



Figura 6.4: Caracterização do movimento em aclave e sentido reverso.



Figura 6.5: Caracterização do movimento em declive e sentido frontal.



Figura 6.6: Caracterização do movimento em declive e sentido reverso.

6.2 Avaliação de desempenho do Vecarr para controle por emulação de impedância mecânica amigável à cooperação com seres humanos

Na a 1ª proposta de operação do Vecarr, o mesmo foi configurado para emular o comportamento mecânico de uma impedância que transmite aos seres humanos a sensação de interação com algo flexível, tranquilizante, com resposta dinâmica compatível à humana. A operação mediante tais adjetivos caracteriza no presente trabalho a operação amigável do Vecarr e a mesma é atingida se o veículo desenvolver as mesmas trajetórias mecânicas de uma massa, coeficiente viscoso e mola equivalentes dados, respectivamente, por 13kg, 50N/(m/s) e 0N/m.

Como as variáveis de trajetória mecânica são dinamicamente acopladas, é possível se avaliar tanto através do sinal de velocidade, quanto dos sinais de posição ou aceleração, qual é a similaridade entre a resposta do Vecarr e aquela que seria apresentada pela impedância mecânica amigável que se deseja emular. Como o encoder instalado no motor irá medir o deslocamento do veículo no seu próprio referencial e o mesmo tem atuações de guinada, é pouco conveniente comparar o erro de posição do Vecarr com relação à impedância mecânica que se deseja emular. Mediante essa consideração e tendo em vista que o sistema é dotado de estimação de velocidade angular pelo sinal do encoder, o desempenho do Vecarr será avaliado comparando seu erro de velocidade com relação àquela que seria apresentada pela impedância mecânica amigável. Tais comparações serão feitas mediante todos os possíveis sentidos de deslocamento do veículo e as mesmas são apresentadas nas seções seguintes.

6.2.1 Avaliação de desempenho do Vecarr para deslocamentos em superfícies não inclinadas

Inicialmente foi avaliado o desempenho do Vecarr para deslocamento em direção retilínea, sobre uma superfície não inclinada e em sentidos frontal e reverso. Os deslocamentos avaliados foram de 20m e a massa embarcada de 120kg.

Considerando o deslocamento no sentido frontal, apresenta-se na Figura 6.7 o erro de velocidade entre a impedância mecânica de referência e o Vecarr. Para destacar o efeito de multiplicação de força do acionamento mecatrônico, apresenta-se na Figura 6.8 as forças demandadas do ser humano para percorrer o trajeto em questão com o acionamento habilitado e desabilitado.

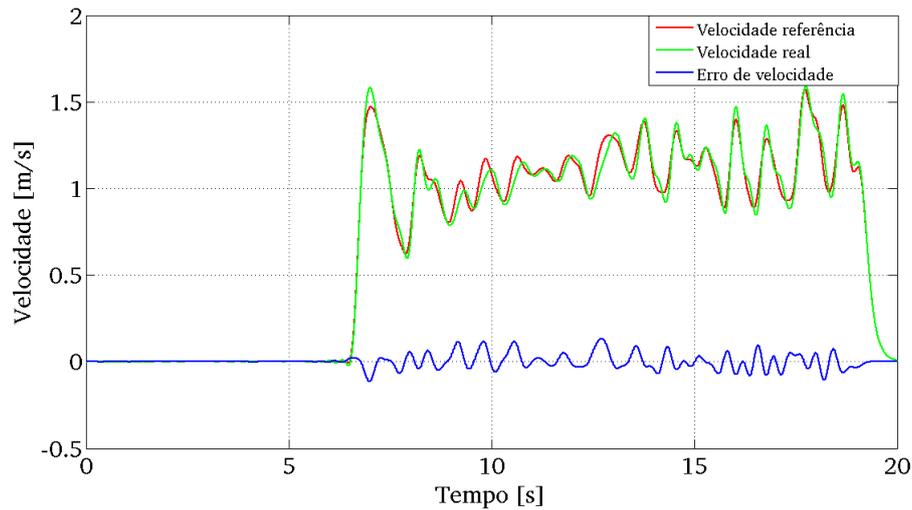


Figura 6.7: Erro, referência e valor real de velocidade do veículo para deslocamento frontal e no plano.

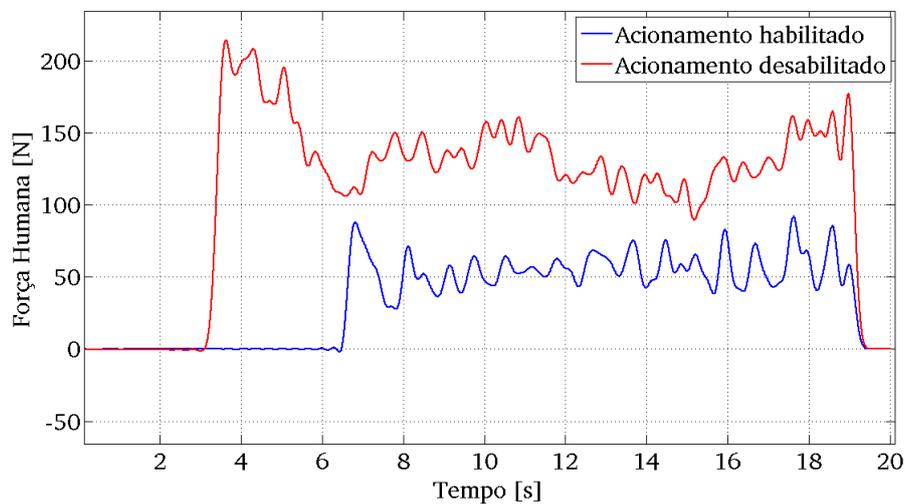


Figura 6.8: Força humana demandada com acionamento habilitado e desabilitado em deslocamento frontal e no plano.

Tal como apresentado na Figura 6.7, o sistema teve desempenho satisfatório para rastreamento de trajetória, uma vez somente as componentes de alta frequência do sinal de referência de velocidade não foram seguidas com erro nulo pelo veículo. Tais componentes de alta frequência ocorrem por oscilações de força impostas pelo braço humano e, tal como mostrado no capítulo 4, o sistema foi projetado para não seguir tais componentes de alta frequência para que o condutor não seja atropelado. Essa opção de projeto foi feita porque as pernas humanas tem uma dinâmica de deslocamento mais lenta que os braços. Além disso, observa-se que o erro de velocidade é um sinal de 3,0Hz de frequência com média nula e, portanto, dentro de intervalos de $1/3$ de segundo o sistema segue o mesmo posicionamento que a impedância mecânica de referência seguiria.

Na Figura 6.8, observa-se o efeito de multiplicação de força disponibilizado pelo aciona-

mento do Vecarr. No início do experimento, quando o sistema está em aceleração, o atuador - ser humano ou motor elétrico - deve prover as forças de aceleração e de carga. Nessa condição transitória, observa-se que o sistema produziu uma multiplicação da força humana de aproximadamente 2,3 vezes. Quando o sistema está com velocidade média constante, ou seja, não há demanda por uma maior força para acelerá-lo, observa-se que o acionamento multiplicou a força humana em aproximadamente duas vezes. Para o deslocamento no plano e com as velocidades do experimento, as forças de carga mais relevantes são os atritos dos mancais. Como os rolamentos presentes nesses mancais são bem lubrificados, eles não oferecerem uma resistência ao movimento tão alta quanto a gravidade ofereceria em deslocamentos sobre superfícies inclinadas e por isso o acionamento só precisou multiplicar a força humana em 2,3 vezes para 120kg de massa total. Como o conjugado de carga dos atritos de mancais é proporcional à massa do veículo, se o sistema estivesse operando com 500kg, o mesmo deslocamento exigiria uma força humana com o acionamento desligado de $500/120$ vezes maior que aquela apreciada no experimento. Por outro lado, a força humana demandada do condutor com o acionamento ligado seria a mesma para 500kg ou 120kg. Assim sendo, para a massa nominal, a multiplicação da força humana seria de $500/120 \times 2,3 = 9,8$ vezes. Outra conclusão extraída a partir do sinal de força humana é que dentro de aplicações que demandam constantes acelerações e frenagens, tais como deslocamentos em vias de trânsito urbano, o Vecarr possibilitaria, dentro de um mesmo deslocamento e sem deslize das rodas no asfalto, um consumo de energia 2,3 vezes menor em cada movimento de partida. Como avaliado nos experimentos descritos no capítulo 3, alguns trajetos de catadores de papel de São João del Rei demandaram 50 partidas. Em cada partida foi embutida uma energia cinética ao sistema em média igual a 100J, considerando uma massa típica embarcada de 200kg, uma velocidade final de deslocamento de 1,0m/s. Se o catador tivesse o auxílio do Vecarr, ele economizaria uma energia de 2,3 vezes menor que $50 \text{ partidas} \times 100 \text{ J/partida}$, ou seja, ele consumiria somente 2174J ao invés de 5000J. A economia viabilizada pelo Vecarr só nas acelerações seria de 2826J, o que é equivalente à energia consumida no içamento de 6 sacos de içamento a um metro de altura e no nível do mar. Além da economia de energia, destaca-se a redução na força muscular instantânea, o qual é responsável por lesões músculo-esqueléticas.

O mesmo experimento foi repetido com sentido de deslocamento revertido. Para esse contexto, apresentam-se nas curvas 6.9 e 6.10 os erro de velocidade do Vecarr com relação à impedância mecânica de referência, bem como a força humana com o acionamento habilitado e desabilitado.

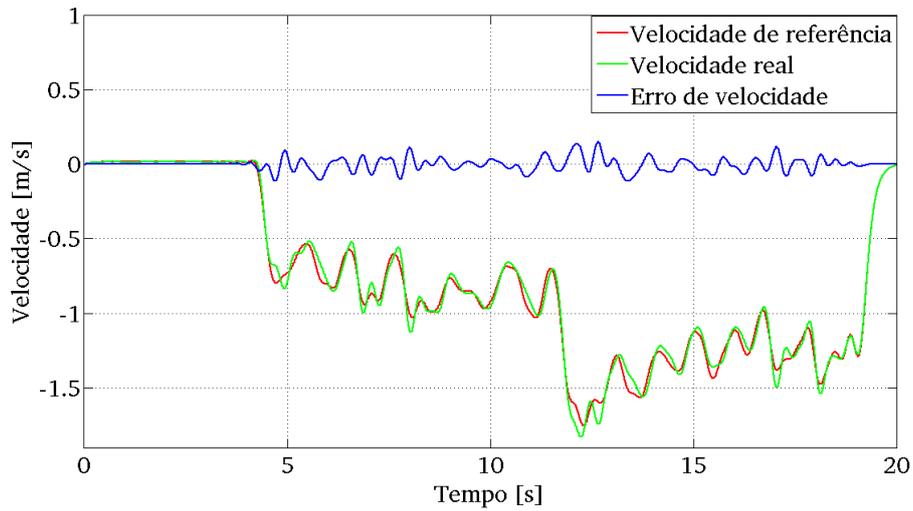


Figura 6.9: Erro, referência e valor real de velocidade do veículo para deslocamento reverso e no plano.

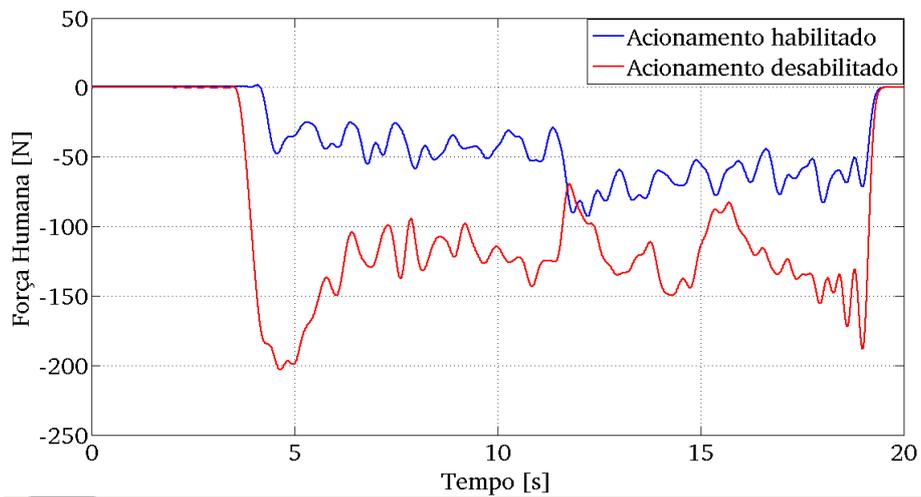


Figura 6.10: Força humana demandada com acionamento habilitado e desabilitado em deslocamento reverso e no plano.

Para o deslocamento em sentido reverso as figuras 6.9 e 6.10 permitem extrair as mesmas conclusões observadas para o deslocamento frontal. Como os experimentos são feitos preservando a maneira intuitiva do condutor, os deslocamentos frontal e reverso não preservam a mesma velocidade nos mesmos pontos do trajeto. Assim sendo, há uma diferença na demanda de força humana nos dois sentidos de deslocamento oscilografados. Porém, observa-se que, em ordem de grandeza, o fator de multiplicação da força humana foi aproximadamente igual nos sentidos frontal e reverso.

Tendo sido avaliados os deslocamentos sobre superfícies inclinadas, o desempenho do Vecarr foi medido na situação de maior demanda de força de tração, a qual ocorre em superfícies inclinadas. Os resultados para tais deslocamentos são apresentados na próxima seção.

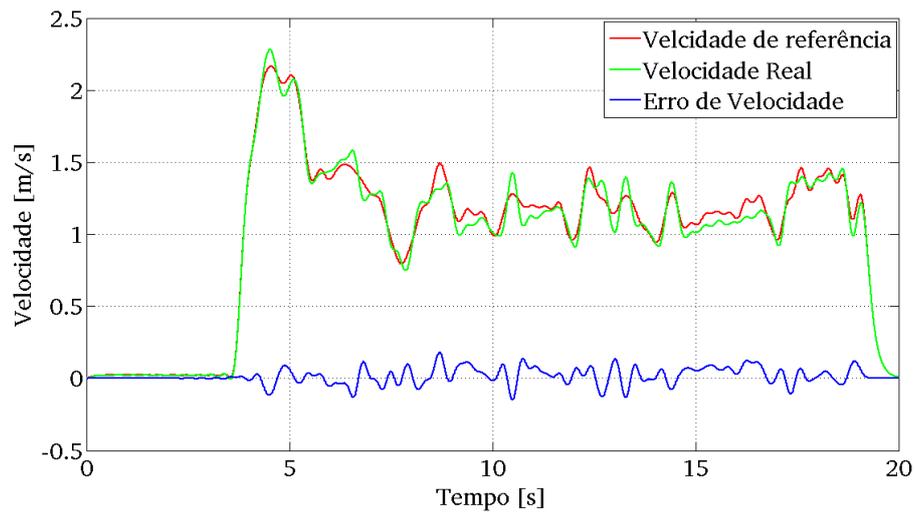


Figura 6.11: Erro, referência e valor real de velocidade do veículo para deslocamento frontal e em subida.

6.2.2 Avaliação de desempenho do Vecarr para deslocamentos em superfícies inclinadas

O desempenho do Vecarr foi avaliado para um deslocamento de 15m sobre uma superfície de inclinação igual a $7,8^\circ$. A massa total do veículo nesses experimentos é de 120kg e foram oscilografados sinais correlatos aos movimentos de subida e descida, cada qual com o veículo se movendo na direção frontal ou reversa.

Para o movimento em sentido frontal e subindo a superfície, apresenta-se respectivamente nas figuras 6.11 e 6.12 os sinais de erro de velocidade do Vecarr com relação à impedância de referência bem como a força humana demandada com o acionamento ligado e desligado.

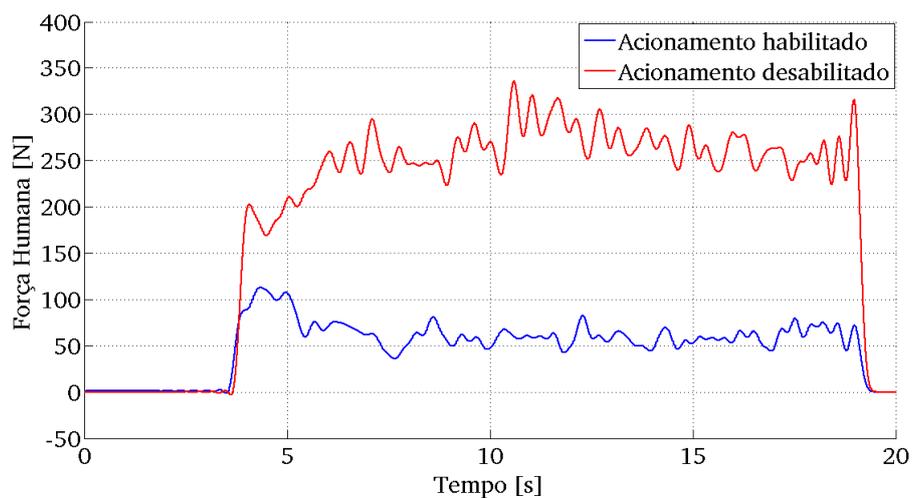


Figura 6.12: Força humana demandada com acionamento habilitado e desabilitado em deslocamento frontal e em subida.

Observa-se pela Figura 6.11 que o sistema segue satisfatoriamente a trajetória de referência da impedância mecânica emulada, mesmo com o acréscimo de carga produzido pela gravidade. Observa-se também que, quando a força humana foi nula, ou seja, quando o condutor soltou a barra de comando, o veículo foi comandado e passou a operar com velocidade nula. Assim sendo, o Vecarr ficou parado mesmo sob o efeito da gravidade agindo em uma massa de 120kg disposta sobre superfície inclinada. Essa observação também conota coerência com a emulação da impedância mecânica desejada, a qual deve desenvolver velocidade nula em regime permanente quando o sistema não recebe força humana.

Os sinais de velocidade do veículo no plano e na subida, tais como mostrados nas figuras 6.7 e 6.11, respectivamente, mostram que o condutor desenvolveu aproximadamente a mesma velocidade média em regime permanente (1,25 m/s). Essa velocidade, nos dois contextos, foi desenvolvida exigindo-se aproximadamente a mesma força do ser humano, tanto no plano quanto na subida, tal como apresentado nas figuras 6.8 e 6.12 respectivamente. Essa constatação mostra a eficiência do sistema para rejeição de carga, uma vez que foi demandado do condutor uma mesma força para o desenvolvimento de velocidades iguais, não importando se o veículo estava no plano ou subindo.

Os sinais de força demandados do condutor na subida para o acionamento habilitado e desabilitado, tal como mostrado na Figura 6.12, mostram que o Vecarr multiplicou a força humana em aproximadamente 7 vezes. Portanto, o trabalho ou a energia consumidas do ser humano é 7 vezes menor quando há a multiplicação de sua força pelo Vecarr. Como a subida onde foi realizado o experimento possui a inclinação típica encontrada em várias cidades do estado de Minas Gerais, e como também a força aplicada pela carga da gravidade é proporcional à massa embarcada, conclui-se que, para a massa nominal de 500kg tipicamente tracionada pelo Vecarr, haverá uma redução na demanda energética do catador de $500\text{kg}/120\text{kg} \times 7 = 29,17$ vezes. Para os catadores de papel de São João del Rei, cuja rotina foi monitorada e apresentada no capítulo 2 dessa tese, há deslocamento em superfícies inclinadas com variações típicas de 15m de altitude, o equivalente a um prédio padrão de 5 andares com 3m de pé direito. Considerando a massa nominal de 500kg tracionada por eles, há um consumo de energia potencial gravitacional para içamento do veículo igual a $500\text{kg} \times 9,81\text{m/s}^2 \times 15\text{m} = 73575\text{J}$. Com a multiplicação de forças do Vecarr, seria consumida do ser humano uma energia 29,17 vezes menor, ou seja, 2522J, o que resulta em uma economia de energia igual a 71052J por subida de 15m. Tal economia equivale aproximadamente ao içamento de 142 sacos de cimento de 50kg a uma altura de 1,0m. Considerando que o catador também precisa consumir energia pra

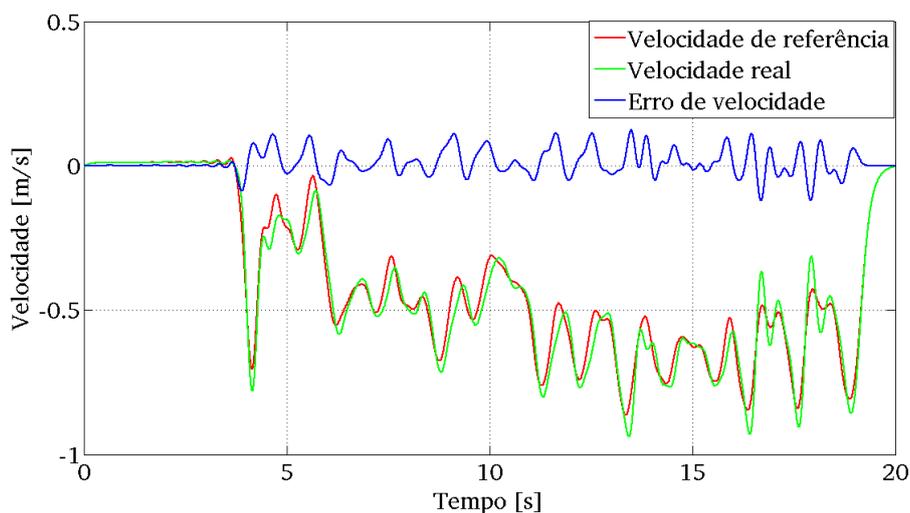


Figura 6.13: Erro, referência e valor real de velocidade do veículo para deslocamento reverso e na descida.

deslocar seu próprio corpo em tais acíves, a economia da energia demandada para tracionar a carga conota ao mesmo considerável acréscimo de qualidade de vida.

Para a mesma superfície, com a mesma distância percorrida e também com 120kg embarcados, foram oscilografos os sinais do Vecarr para o movimento de descida em sentido reverso. São apresentadas nas figuras 6.13 e 6.14 os respectivos sinais de erro entre as velocidades da impedância emulada e do Vecarr, bem como a força humana demandada com o acionamento habilitado e desabilitado.

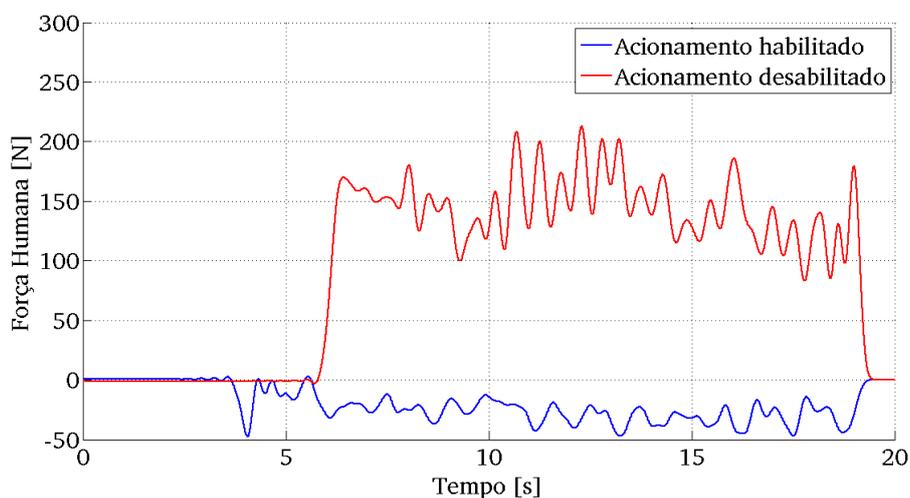


Figura 6.14: Força humana demandada com acionamento habilitado e desabilitado em deslocamento reverso e na descida.

Tal como mostrado na Figura 6.13, o sistema desempenhou rastreamento de trajetória satisfatório e emulou a impedância mecânica de referência no movimento de descida. Além disso, observa-se pelos sinais de força do condutor apresentados nas figuras 6.14 que quando o acionamento está ligado, o ser humano precisa aplicar força no mesmo sentido do movimento, tal como ocorreria com a impedância mecânica emulada. Porém, com o acionamento desabilitado, a força humana é contrária e frenante com relação ao movimento de descida. Além disso, observou-se que a força humana frenante (acionamento desabilitado) possui módulo 6 vezes maior que aquela observada com o acionamento habilitado. Como o movimento nesses dois experimentos produziu uma mesma variação de altitude, observa-se que, com o acionamento habilitado, o consumo de energia do ser humano também será aproximadamente 6 vezes menor com o acionamento habilitado. Destaca-se também que no movimento de descida é feito à velocidade média constante e então o Vecarr implementa frenagem regenerativa, convertendo a energia potencial gravitacional do veículo em energia química no banco de baterias, salvo as perdas. Tal como mostrado no capítulo 3 dessa tese, o motor elétrico de tração foi escolhido para operar com máxima eficiência, e assim uma fração representativa da energia do veículo poderá ser regenerada em descidas à velocidade constante. Essa opção viabiliza a redução na capacidade de carga nominal do banco de baterias, uma vez que ele não será recarregado somente quando houver potência elétrica disponível da concessionária. Se o Vecarr operar em cenários onde o movimento em aclave for feito sem carga útil e o declive for feito com carga, poderá ocorrer regeneração de toda a energia inicial das baterias que tenha sido consumida no movimento ascendente. Nessa opção de gerenciamento energético, a especificação do banco de baterias poderia contemplar unidades de menor capacidade de carga, reduzindo assim o custo de aquisição das mesmas.

O experimentos com movimento ascendente foi repetido, porém com o veículo orientado em sentido reverso. Os sinais de erro de velocidade e força humana para tal situação são apresentados nas figuras 6.15 e 6.16.

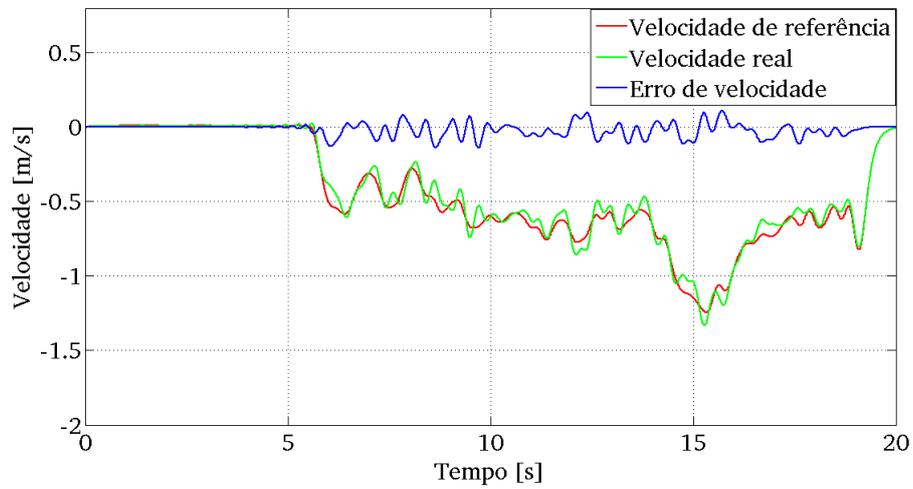


Figura 6.15: Erro, referência e valor real de velocidade do veículo para deslocamento reverso e na subida.

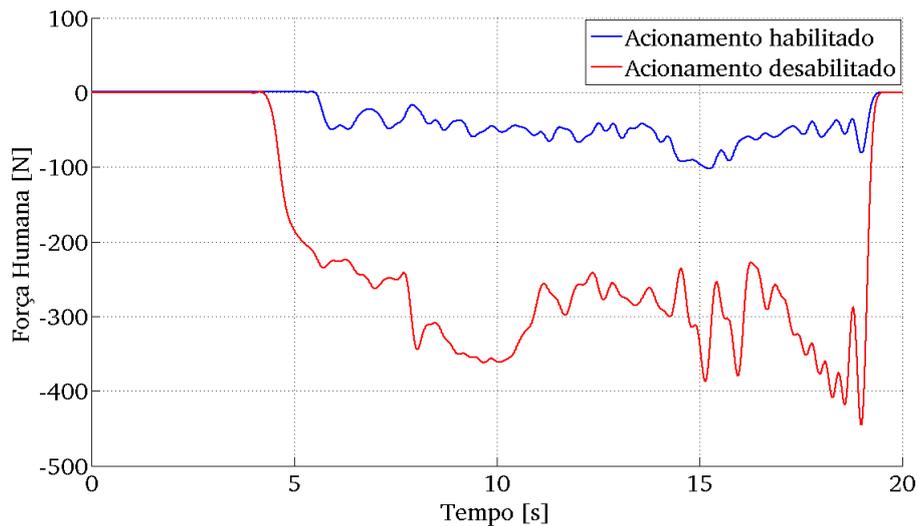


Figura 6.16: Força humana demandada com acionamento habilitado e desabilitado em deslocamento reverso e na subida.

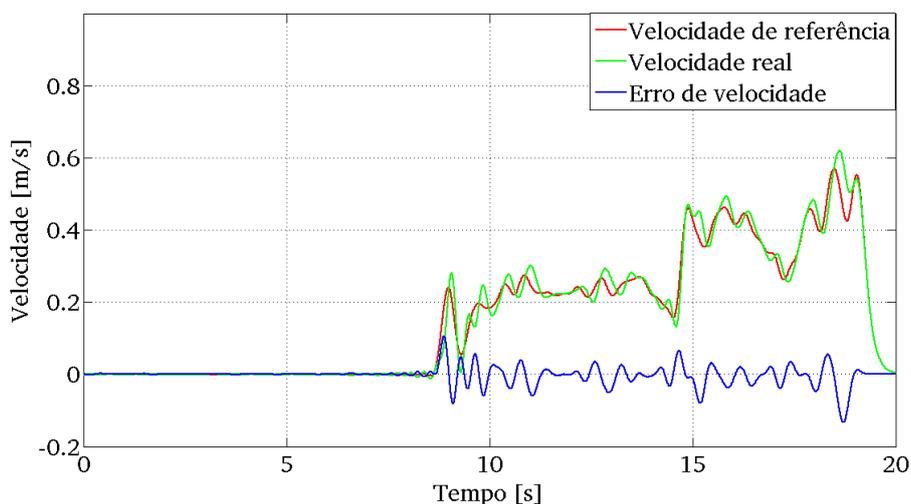


Figura 6.17: Erro, referência e valor real de velocidade do veículo para deslocamento frontal e na descida.

Como o Vecarr não possui distribuição uniforme de massa, observa-se pelas figuras 6.12 e 6.16 que, com o acionamento desabilitado, são demandadas forças diferentes do condutor quando o veículo é invertido para o deslocamento em modo ascendente. No experimento de deslocamento em sentido reverso e ascendente, o condutor só conseguiu impôr aceleração suficiente para se atingir a velocidade final típica de 1,0m/s quando o veículo já estava em movimento. Nesse contexto demandou-se força para aceleração e para rejeição da gravidade, o que levou a picos de força humana aproximadamente iguais a 400N. Porém, com o acionamento do Vecarr habilitado, tal pico alcançou 100N. Além disso, o erro de velocidade foi maior no movimento ascendente e reverso, o que ocorreu, muito provavelmente, pelas oscilações rápidas do sinal de força imposto pelo condutor, uma vez que o Vecarr possui comprimento elevado e nesse movimento ele fica à frente do condutor, o qual tem que frear e acelerar constantemente o veículo para observação dos obstáculos e condução com segurança.

O último ensaio em superfície inclinada foi realizado em movimento descendente com o veículo em sentido frontal. As curvas obtidas para o erro de velocidade entre a impedância mecânica de referência e o Vecarr, bem como a força humana demandada com o acionamento habilitado e desabilitado, são apresentadas nas figuras 6.17 e 6.18.

Observa-se no sinal de força humana apresentado na Figura 6.18 que, mesmo em movimento descendente, o Vecarr demanda força do condutor no sentido do movimento, preservando a maneira natural de condução natural das pessoas. Foi garantida também a emulação da impedância mecânica equivalente, uma vez que o erro de velocidade apresentado na Figura 6.17 só atingiu valores não nulos em oscilações bruscas do comando de força.

Os comandos bruscos de força são necessários em alguns eventos, tais como ocorrerá em

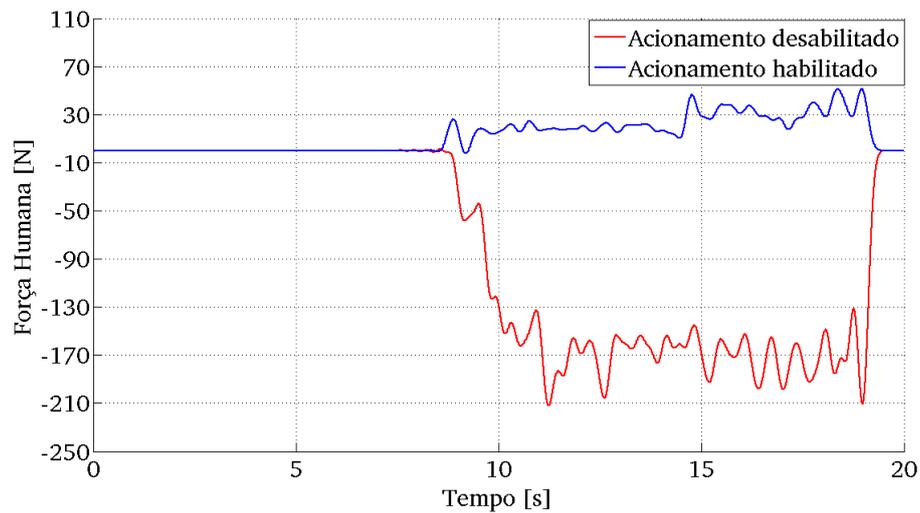


Figura 6.18: Força humana demandada com acionamento habilitado e desabilitado em deslocamento frontal e na descida.

frenagens emergenciais para se evitar acidentes. Apesar do Vecarr ser configurado pela dinâmica das pernas humanas, comandos de força em degrau produzidos pelos braços deverão resultar em variações de velocidade adequadas para a rejeição de acidentes. A caracterização do desempenho do Vecarr em tais cenários é apresentada na próxima seção.

6.2.3 Avaliação de desempenho do Vecarr para comandos bruscos de reversão

Nessa seção será avaliada a distância percorrida pelo Vecarr mediante comandos bruscos de reversão do seu movimento e considerando que o condutor esteja correndo no momento de aplicação de tais comandos.

Mediante o cenário listado, apresenta-se nas figuras 6.19 e 6.20 os sinais de velocidade, erro de velocidade, posição e força humana impostas ao Vecarr.

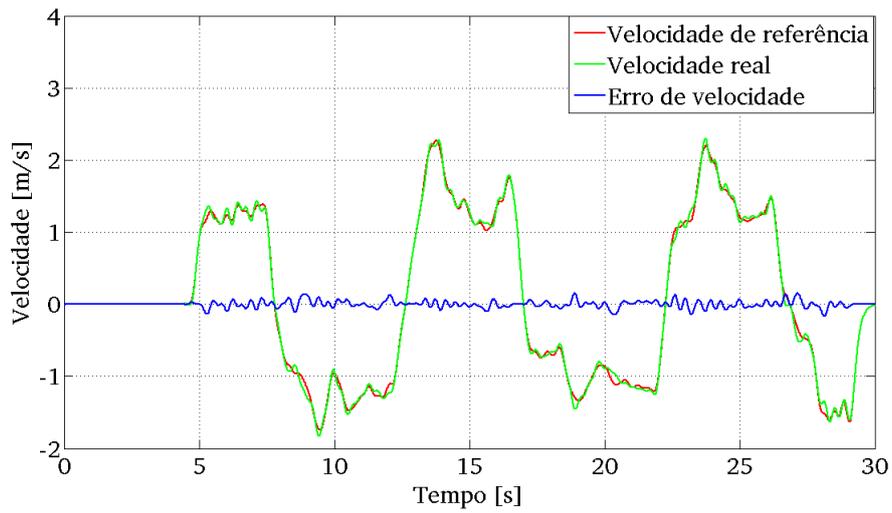


Figura 6.19: Erro, referência e valor real de velocidade do veículo para exercícios de reversão brusca no plano.

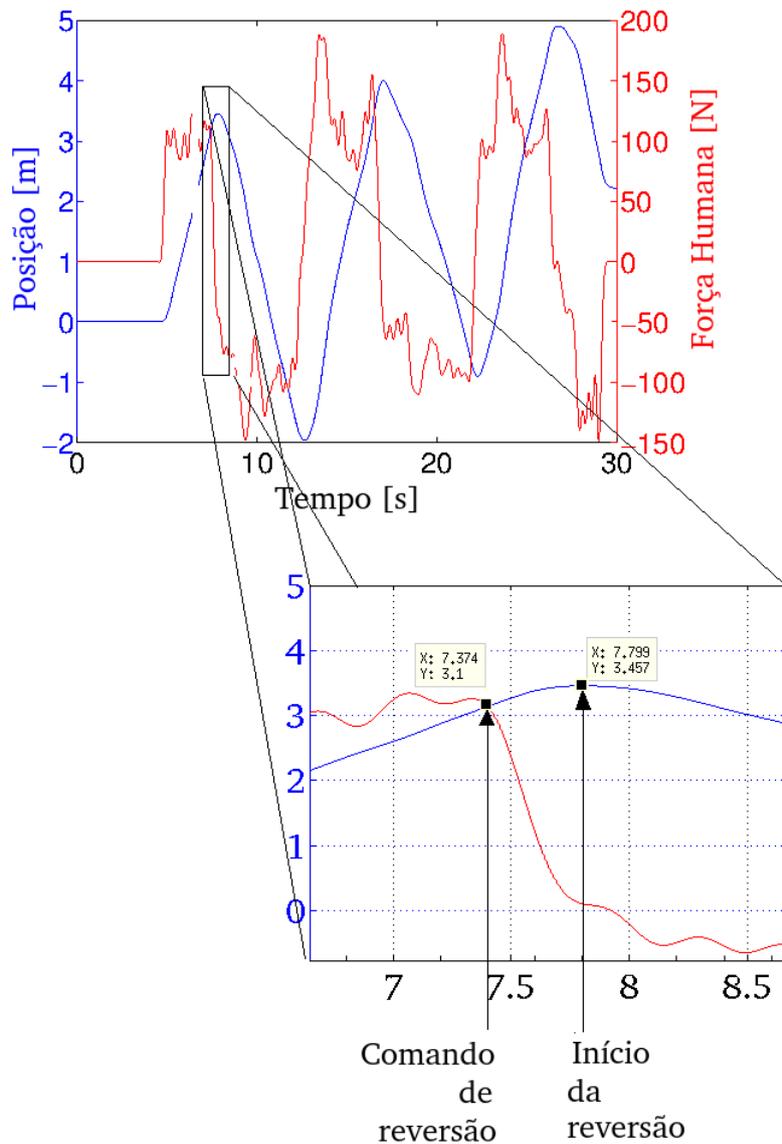


Figura 6.20: Força humana e posição do Vecarr para exercícios de reversão brusca no plano.

Uma das reversões aplicadas ao Vecarr é mostrada em destaque na Figura 6.20. A análise da Figura mostra que ela é muito similar ao comportamento nas demais reversões e, portanto, as conclusões extraídas por ela são representativas. Observa-se que, do início do comando de reversão ao início da reversão do veículo foram consumidos $7,799 - 7,374 = 425\text{ms}$ e o veículo percorreu $3,457 - 3,1 = 35,7\text{cm}$. Considerando que o condutor estava correndo nesses exercícios, ou seja, a velocidade inicial na reversão era elevada, e que o veículo conseguiu parar em $35,7\text{cm}$, conclui-se que o mesmo é seguro em situações de risco, uma vez que $35,7\text{cm}$ é uma distância menor que a largura da passada típica de um adulto. Assim sendo, se o condutor estivesse posicionado entre o Vecarr e um obstáculo, tais como um muro ou um carro, e ele soltasse a barra de comando, haveria a paralisação do Vecarr em uma distância compatível com a do seu braço esticado, reduzindo assim o risco de atropelamento do condutor pelo Vecarr. Além disso, caso o condutor tropece e caia, haverá um baixo risco de atropelamento pelo Vecarr, uma vez que a barra de comandos situa-se a $1,20$ metros da roda de tração do veículo, a qual seria a primeira a colidir com o condutor.

6.3 Avaliação de desempenho do Vecarr para operação com regulação de força constante

Nessa seção será avaliado o desempenho do Vecarr sob a 2ª estratégia de controle proposta nessa tese, a qual foi projetada e sintonizada no capítulo 4 e cujo diagrama de blocos é repetido na Figura 6.21 para conveniência do leitor.

Tal como mostrado na Figura 6.21, nessa estratégia de controle o Vecarr não emula nenhum amortecimento virtual, tal como ocorre na 1ª estratégia de controle. Portanto, se o usuário manter a célula de carga pressionada, haverá o aumento no comando de torque do veículo pelo efeito do integrador da malha de controle. Se a carga não aumentar com o aumento do conjugado eletromagnético, o que vai ocorrer na maior parte das vezes, a velocidade do veículo irá aumentar. Esse aumento de velocidade ocorrerá sem que o usuário precise aumentar a força aplicada na barra de comando. Por outro lado, será exigido que o usuário se desloque com velocidade crescente também. Assim sendo, desde que o usuário consiga correr junto com o veículo, não haverá restrições do sistema para a velocidade final que ele possa alcançar. Tal comportamento denota um modo de operação mais perigoso para o Vecarr que aquele proposto na emulação de impedância mecânica amigável, uma vez que tal emulação demanda força crescente do usuário para operação a velocidade crescente. Por outro lado, a regulação de força

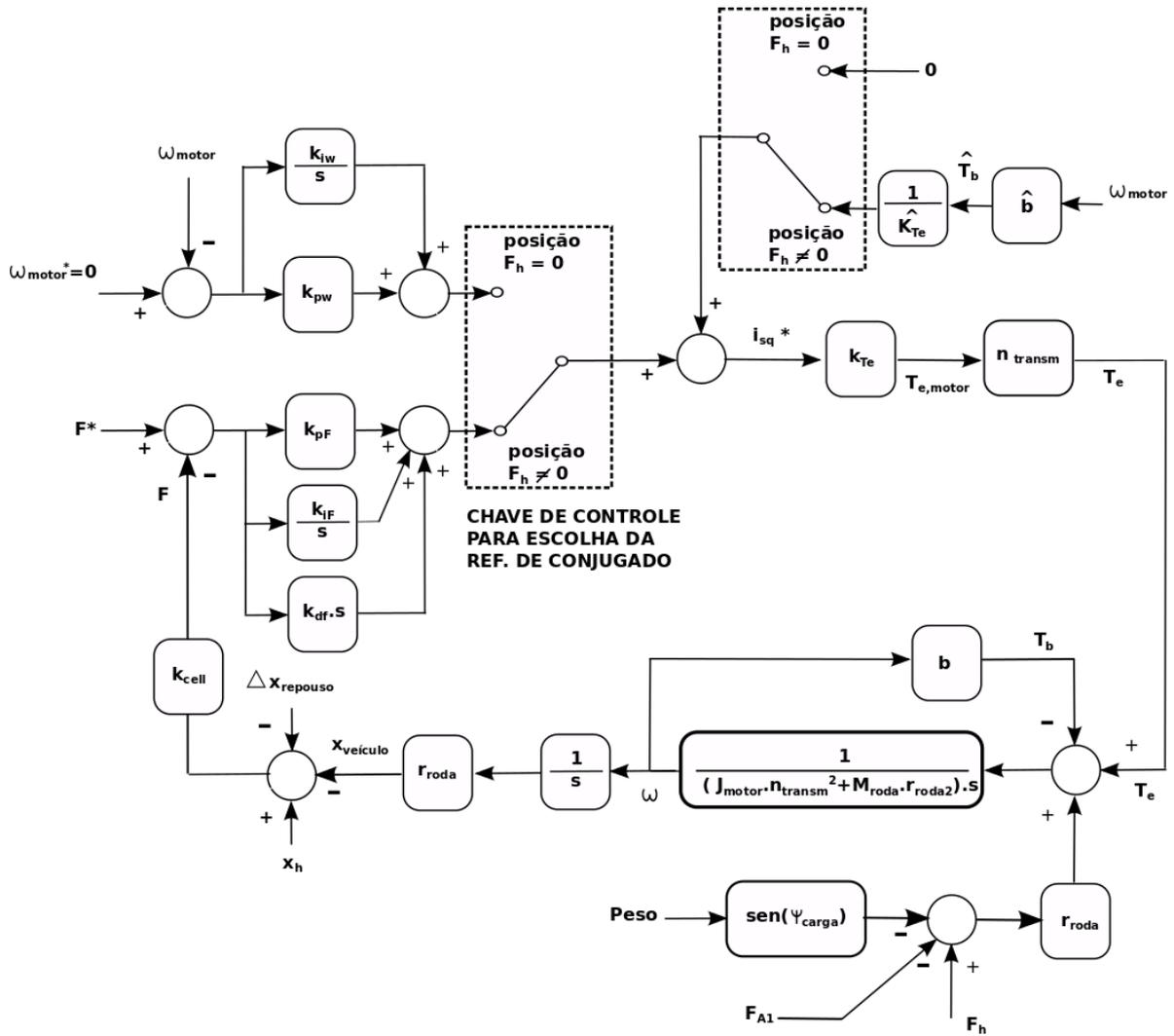


Figura 6.21: Estrutura completa do sistema para regulador de força constante.

constante favorece operações onde o usuário prefira garantir maior produtividade devido ao deslocamento mais rápido do Vecarr. O último cenário descrito pode ser exemplificado com catadores de papel, uma vez que alguns desses indivíduos tem condições físicas para correr e tem a vontade de fazê-lo para aumentar o volume coletado de material dentro de um intervalo de tempo. Essa demanda por alta produtividade também ocorreria com produtores rurais que pudessem aproveitar a alta de preço de algum produto disponível em sua plantação, desde que a colheita fosse feita o mais rápido possível.

Mediante tais considerações, são apresentadas e analisadas nas próximas subseções o desempenho do Vecarr nas situações típicas de operação às quais o mesmo será exposto.

6.3.1 Avaliação de desempenho do Vecarr para deslocamentos em superfícies não inclinadas

Inicialmente o Vecarr foi testado com deslocamento em uma superfície não inclinada, sendo a massa total do veículo igual a 120kg.

Para caracterizar o desempenho do veículo foram amostrados os sinais de erro de força e de velocidade, os quais são apresentados, respectivamente, nas figuras 6.22 e 6.23.

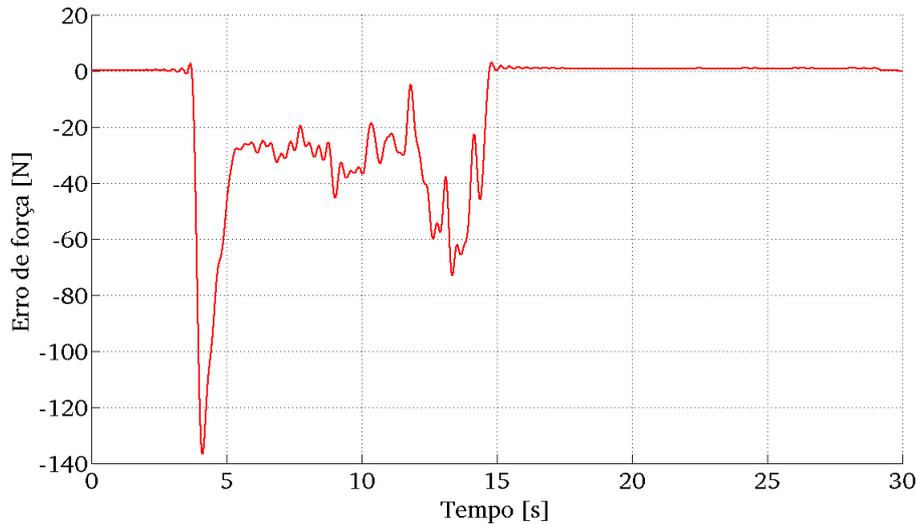


Figura 6.22: Erro de força do Vecarr para deslocamento frontal e no plano.

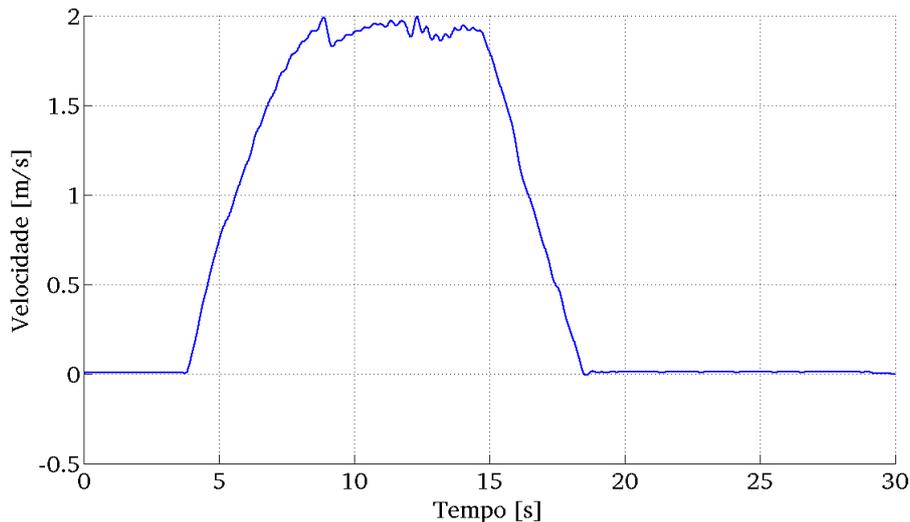


Figura 6.23: Velocidade para deslocamento frontal e no plano.

Observa-se na Figura 6.22 que o sistema operou com um erro médio de força igual a 30N, o que foi provocado pela compressão que o condutor conseguiu impôr durante um movimento de corrida junto ao veículo. Pela estrutura de controle apresentada na Figura 6.21, observa-se que o sistema só se desloca se houver erro de força na malha de controle.

Como a malha de controle em questão possui referência de força humana igual a zero, o sinal de erro de força é igual ao negativo do sinal de força imposto pelo condutor. Observa-se então pelas figuras 6.22 e 6.23 que os comandos de alta frequência impostos pelo condutor não são reproduzidos pelo sistema de controle sobre a velocidade que o veículo desenvolve. Essa conclusão caracteriza o sucesso no projeto de sintonia dos compensadores, uma vez que o mesmo foi feito para filtrar componentes de comando impostos pelo braço que são maiores que aqueles realizáveis pelas pernas do condutor.

Ao se comparar os sinais de velocidade e força obtidos nesse ensaio com os mesmos sinais obtidos na operação com emulação de impedância mecânica (figuras 6.7 e 6.8), observa-se que o Vecarr desenvolveu uma velocidade maior para uma mesma força humana quando regulado por força constante. Tal comportamento comprova o desempenho esperado para os projetos das duas estratégias de controle. Como a velocidade de 2,0m/s desenvolvida em regime permanente no ensaio em questão corresponde ao deslocamento de corrida por seres humanos [76], observa-se que a proposta de regulação de força constante garantiu o desenvolvimento de uma maior velocidade sem demandar força humana excessiva.

O mesmo experimento foi repetido em superfície plana, com 120kg, porém com deslocamento reverso. Os sinais de erro de força e velocidade são apresentados nas figuras 6.24 e 6.25.

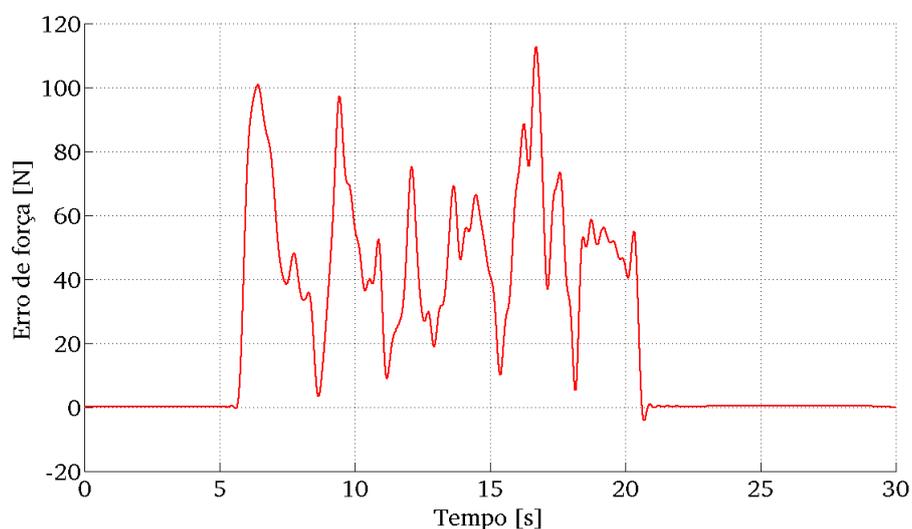


Figura 6.24: Erro de força do Vecarr para deslocamento reverso e no plano.

Para o movimento reverso o condutor não tem a visão dos obstáculos no sentido de movimento do veículo, e nessa condição ele(a) irá soltar a barra de comandos ou reduzir a força de tração para redução de velocidade diversas vezes em um dado trajeto. Tal constatação é mostrada nas figuras 6.24 e 6.25 e destacada nos instantes que há aceleração negativa no motor. A aceleração negativa é regulada pela força do usuário. Quando tal força é nula, o

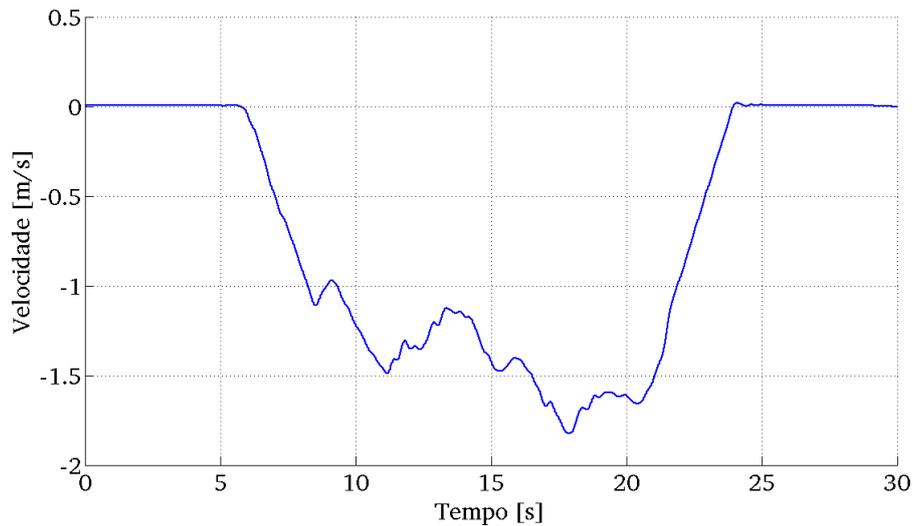


Figura 6.25: Velocidade para deslocamento reverso e no plano.

sistema controla tal frenagem através de uma malha para regulação de velocidade com uma taxa de 1800rpm/6segundos. Observa-se também que os comandos de alta frequência do sinal de força não foram reproduzidos no sinal de velocidade, diminuindo-se então a probabilidade de atropelamentos do usuário pelo Vecarr.

O cenário de maior exigência de rejeição à carga e também mais perigoso para o condutor ocorre nos deslocamentos em superfícies inclinadas. Tais contextos serão analisados na próxima seção.

6.3.2 Avaliação de desempenho do Vecarr para deslocamentos em superfícies inclinadas

Nessa avaliação de desempenho os deslocamentos foram feitos em uma superfície com inclinação de $7,8^\circ$ e massa total do veículo igual a 120kg. Os ensaios foram feitos sem nenhuma restrição à forma como o usuário comandou o veículo.

Para o deslocamento frontal e em aclave, apresenta-se nas figuras 6.26 a 6.30 os respectivos sinais de erro de força, velocidade do Vecarr, potência desenvolvida pelo condutor, energia consumida do condutor e altitude alcançada pelo veículo a partir do ponto inicial do movimento.

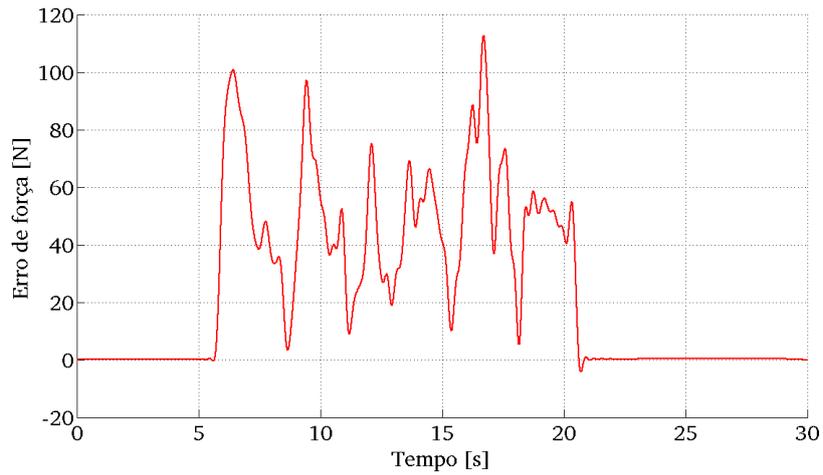


Figura 6.26: Erro de força do Vecarr para deslocamento frontal em acrive.

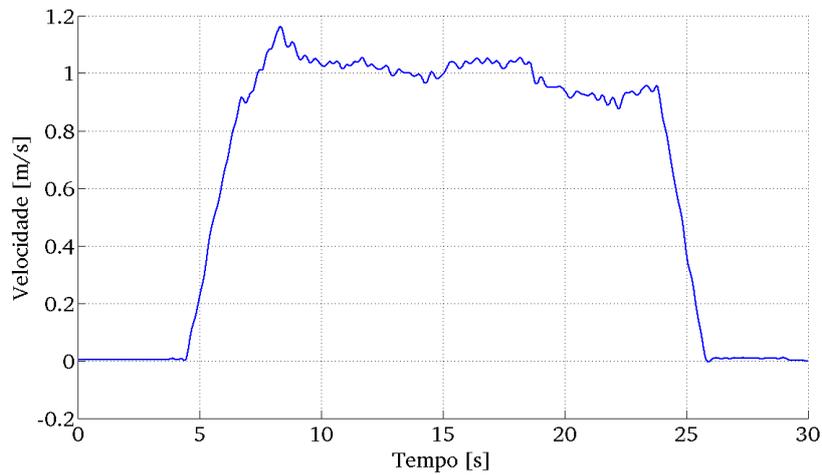


Figura 6.27: Velocidade para deslocamento frontal em acrive.

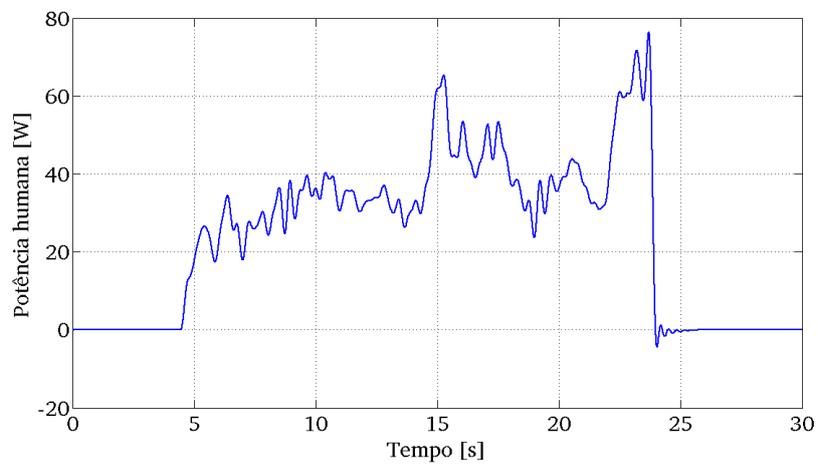


Figura 6.28: Potência desenvolvida pelo condutor para deslocamento frontal em acrive.

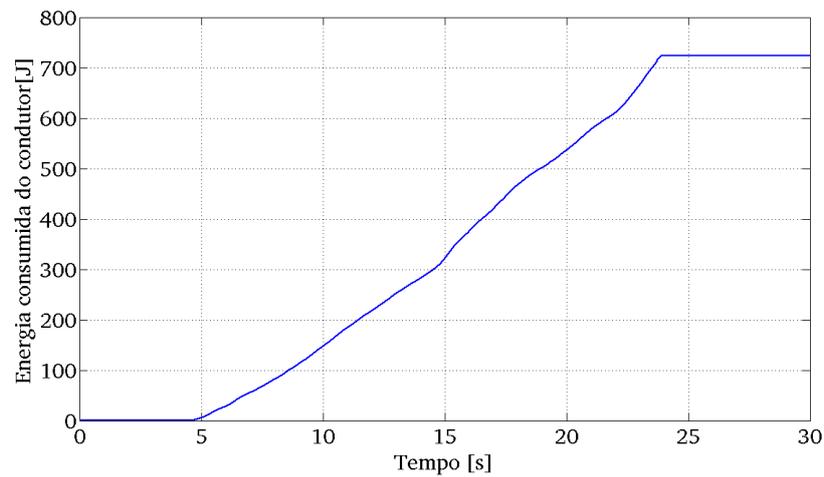


Figura 6.29: Energia consumida do condutor para deslocamento frontal em acive.

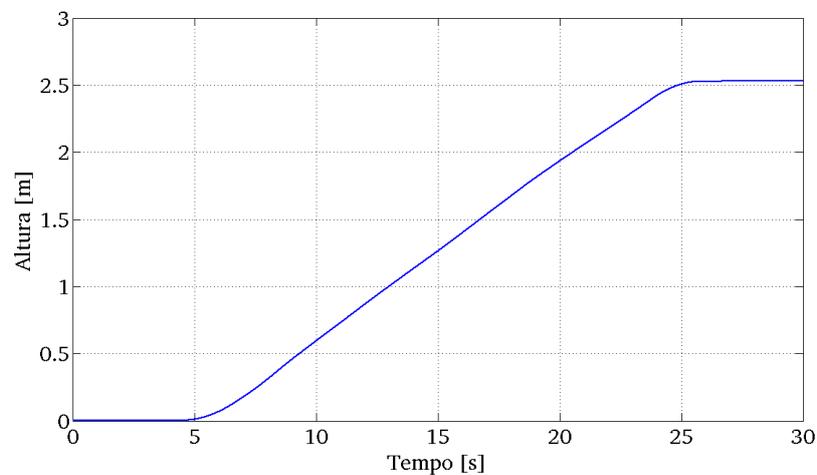


Figura 6.30: Altitude desenvolvida pelo veículo a partir do ponto inicial do movimento para deslocamento frontal em acive.

Observa-se pelas figuras 6.26 e 6.27 que o experimento exigiu do condutor uma força média de 35N e que o deslocamento do Vecarr foi feito a uma velocidade média de 1,0m/s. Como mostrado na Figura 6.12, quando foi desenvolvido o mesmo deslocamento sem o acionamento elétrico habilitado, demandou-se do condutor uma força média de 350N, o que demonstra um fator de multiplicação de força de 10 vezes.

Destaca-se também que na estratégia de controle em questão o Vecarr não opera sob regulação de velocidade, o que viabiliza a operação do mesmo com outras velocidades médias para a mesma força aplicada pelo condutor. Tal comportamento é interessante por viabilizar a utilização do veículo por pessoas que consigam aplicar um mesmo nível de força à célula de carga mas que não consigam se deslocar a uma mesma velocidade. Tal flexibilidade de operação não ocorre para o controlador que emula uma impedância mecânica de referência, uma vez que nessa estratégia uma dada força aplicada à célula de carga sempre levará à uma única velocidade de operação.

Na curva de potência demandada do condutor - Figura 6.28 - observa-se um valor médio de 35W durante a subida. Nos experimentos realizados com catadores de papel e apresentados no capítulo 2 dessa tese, tal potência atinge valores de 420W. Considerando o crescimento na probabilidade de lesões pelo efeito de aplicação brusca de força em pequenos intervalos de tempo, conclui-se que o Vecarr mostra-se efetivo para contribuir com a redução de lesões músculo-esqueléticas nos profissionais que trabalham em cooperação com o mesmo.

Pela Figura 6.29, observa-se que o condutor consumiu uma energia total de 725J para realizar o experimento. Por outro lado, tal como pode ser deduzido da curva de altitude do veículo - Figura 6.30 - somente a massa do mesmo consumiu uma energia potencial gravitacional de $120\text{kg} \cdot 9,8\text{m/s}^2 \cdot 2,6\text{m} = 3057\text{J}$, e esse valor não leva em conta a energia consumida pelos atritos dos mancais. Portanto, em um pior cenário onde os mancais estejam perfeitamente lubrificados e com atrito desprezível, o Vecarr viabilizou ao condutor uma economia de energia igual 76,28% . Essa disponibilidade extra de energia viabilizaria aumento de produtividade e renda em diversas atividades.

No próximo experimento foi avaliado o desempenho do Vecarr para deslocamento em declive e sentido reverso. Para tal avaliação, apresentam-se nas figuras 6.31 e 6.32 as curvas de erro de regulação da força humana e velocidade de deslocamento do veículo.

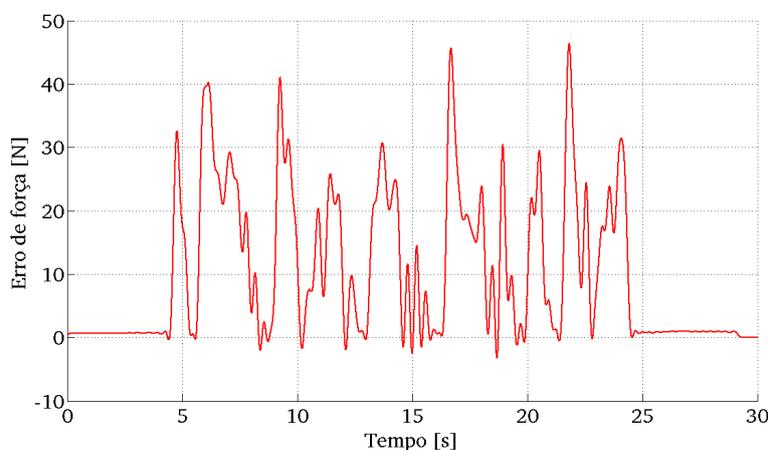


Figura 6.31: Erro de força do Vecarr para deslocamento reverso e em declive.

Pela Figura 6.31 observa-se que foi demandado do usuário uma força média inferior a 20N, o que é inferior ao valor demandado na subida - Figura 6.12 - devido ao conjugado da gravidade atuar no mesmo sentido do movimento. Observa-se também que tal força foi recorrentemente anulada pela atitude do usuário de soltar a barra de comando quando o veículo atingiu velocidades elevadas em um contexto onde o usuário não enxerga os obstáculos no sentido de movimento do veículo. Pela curva de velocidade - Figura 6.32 - observa-se que o veículo frenou com dinâmica adequada frente aos comandos de desaceleração produzidos pelo

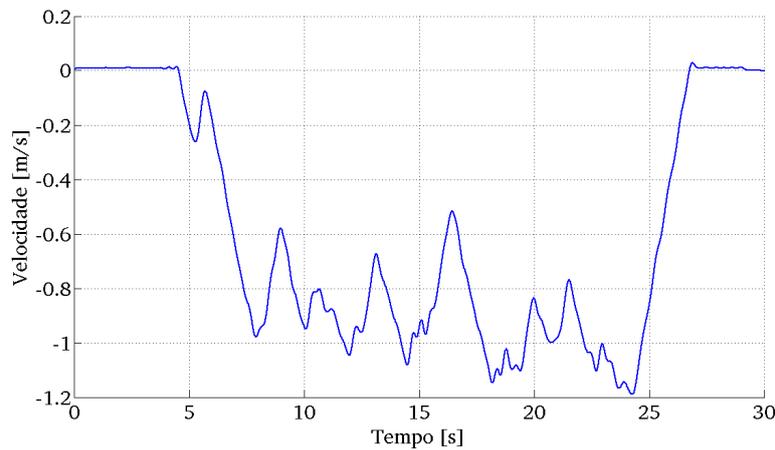


Figura 6.32: Velocidade para deslocamento reverso e em declive.

usuário. Tal comportamento garante a condução segura do veículo.

No próximo experimento o Vecarr foi monitorado para deslocamento em aclave porém em sentido reverso. As curvas de erro de força e velocidade são apresentadas, respectivamente, nas figuras 6.33 e 6.34.

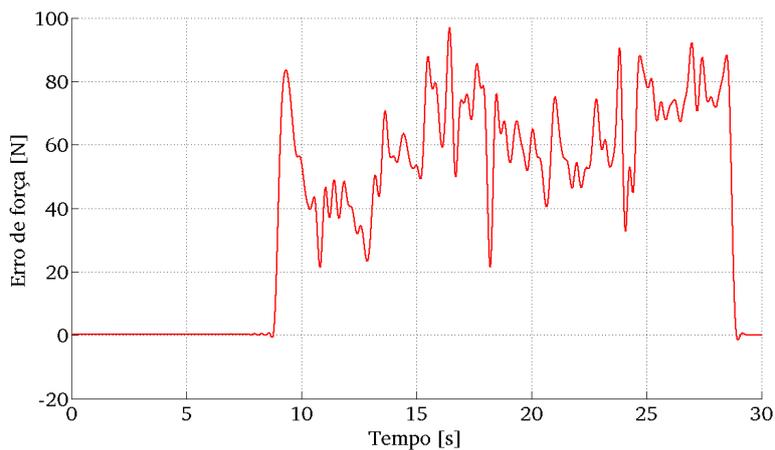


Figura 6.33: Erro de força do Vecarr para deslocamento reverso e em aclave.

Pelas figuras 6.33 e 6.34 observa-se que vibrações de alta frequência no sinal de força dos braços não são traduzidos como oscilações de alta frequência na velocidade, mesmo embora o condutor estivesse em uma rua de calçamento de pedras, as quais amplificam a já presente vibração dos braços em cada passada.

No último possível movimento em superfície inclinada, o Vecarr foi monitorado para deslocamento em declive e sentido frontal. As curvas de erro de força, velocidade, potência e energia desenvolvidas pelo usuário, distância percorrida e altitude são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 6.35 a 6.40.

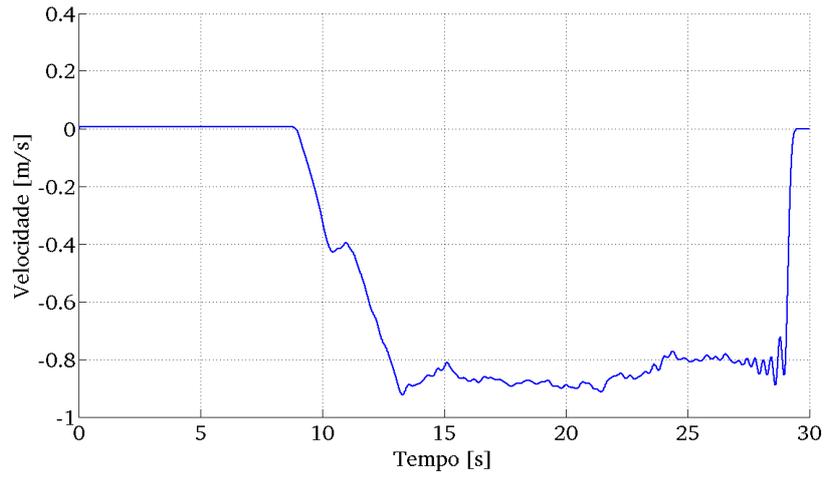


Figura 6.34: Velocidade para deslocamento reverso e em aclive.

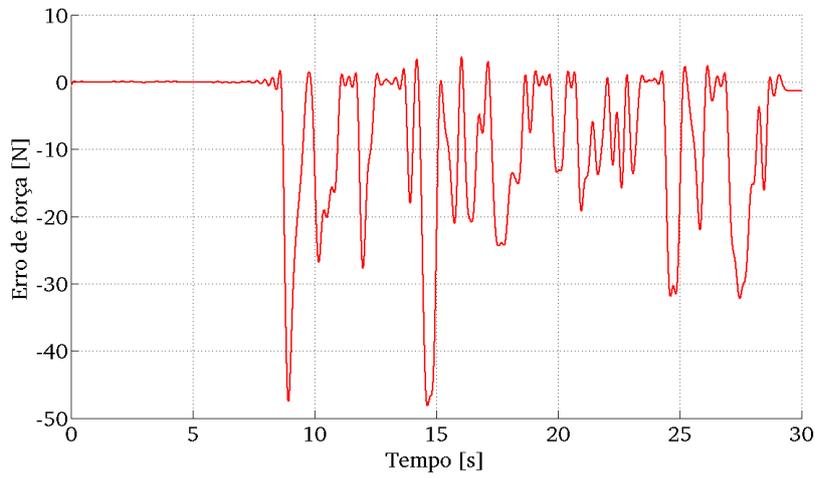


Figura 6.35: Erro de força do Vecarr para deslocamento frontal e em declive.

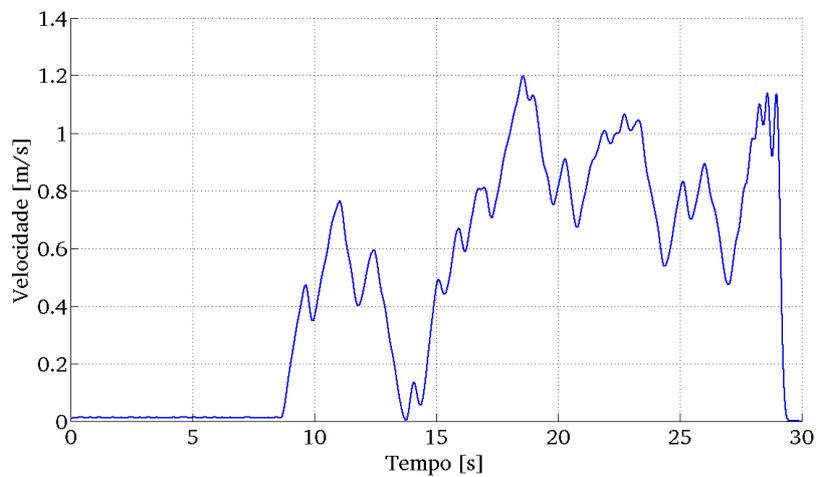


Figura 6.36: Velocidade para deslocamento frontal e em declive.

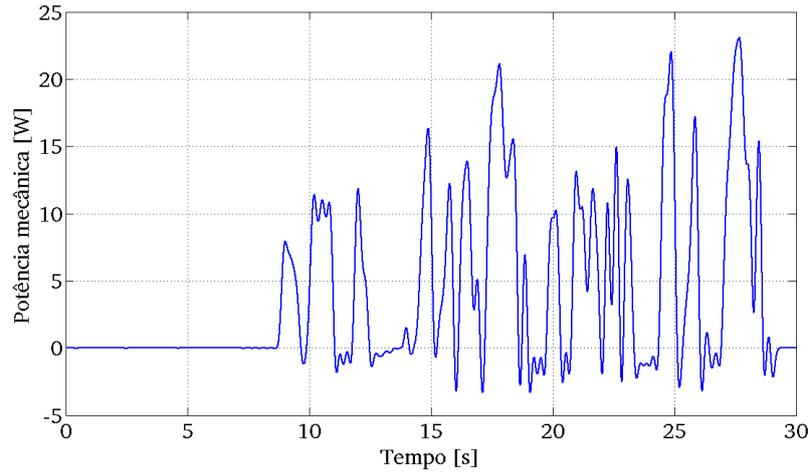


Figura 6.37: Potência consumida do condutor para deslocamento frontal e em declive.

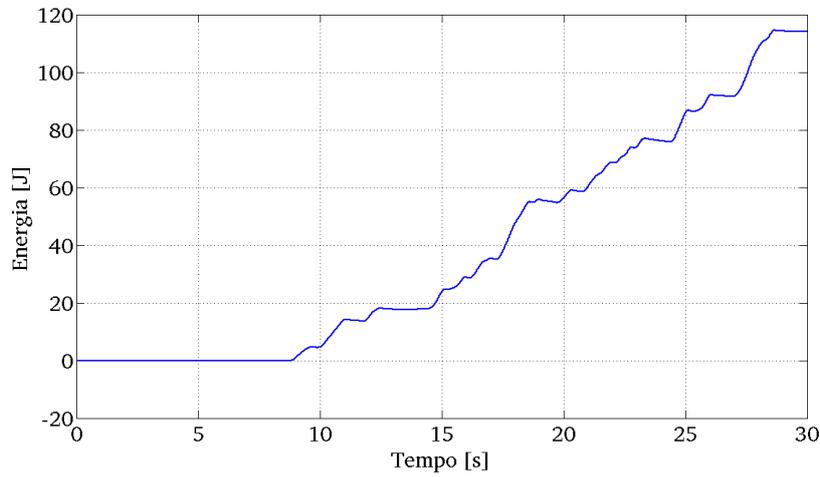


Figura 6.38: Energia consumida do condutor para deslocamento frontal e em declive.

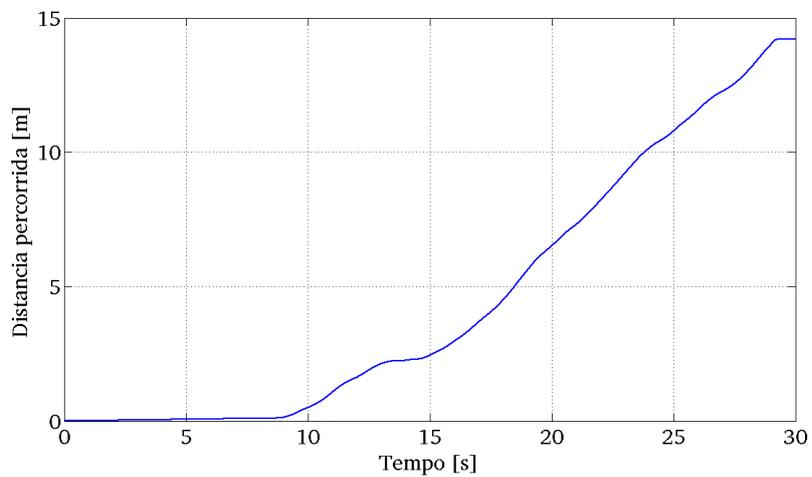


Figura 6.39: Posição do veículo para deslocamento frontal e em declive.

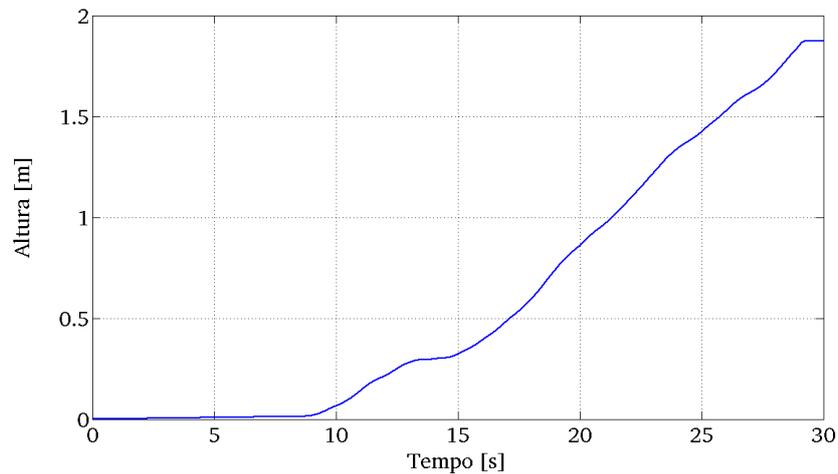


Figura 6.40: Altitude para deslocamento frontal e em declive.

6.3.3 Avaliação de desempenho do Vecarr para comandos bruscos de reversão

Nesse experimento foi avaliado o desempenho do Vecarr para situações emergenciais onde o condutor precise frear ou reverter bruscamente o sentido de deslocamento do veículo de tal modo que não ocorram atropelamentos ou colisões.

Para isso foi avaliada a distância percorrida até que o sentido de deslocamento do Vecarr se altere considerando que o mesmo se desloca com velocidade compatível à corrida de humanos e que há a aplicação de um comando de força humana brusco para reversão. O exercício foi feito em superfície não-inclinada e com 120kg de carga. Os resultados serão apresentados através dos sinais de velocidade, erro de força e distância percorrida pelo Vecarr, tal como mostrado nas Figuras 6.42, 6.41.

Como apresentado na Figura 6.41, o tempo decorrido entre o comando e o início da reversão foi de $10,53 - 8,62 = 1,91$ segundos, sendo que a distância percorrida nesse intervalo foi de $5,082 - 3,01 = 2,072$ m. Comparado tal resultado à distância de 34 cm percorrida para o início da reversão quando utilizando o controlador por emulação de impedância mecânica, conclui-se que o regulador de força constante possui um comportamento mais perigoso para o condutor em situações de emergência. Tal comportamento ocorre porque o regulador em questão opera com erro de força durante o deslocamento, e tal erro é integrado no regulador da malha de controle, levando o integrador frequentemente à saturação. Nessa condição, quando o usuário aplica o comando de reversão, o integrador precisa de muito tempo para reverter o sinal de sua saída e, dependendo da sintonia do regulador proporcional, o comando de corrente de conjugado pode também consumir muito tempo até que seu sinal seja invertido.

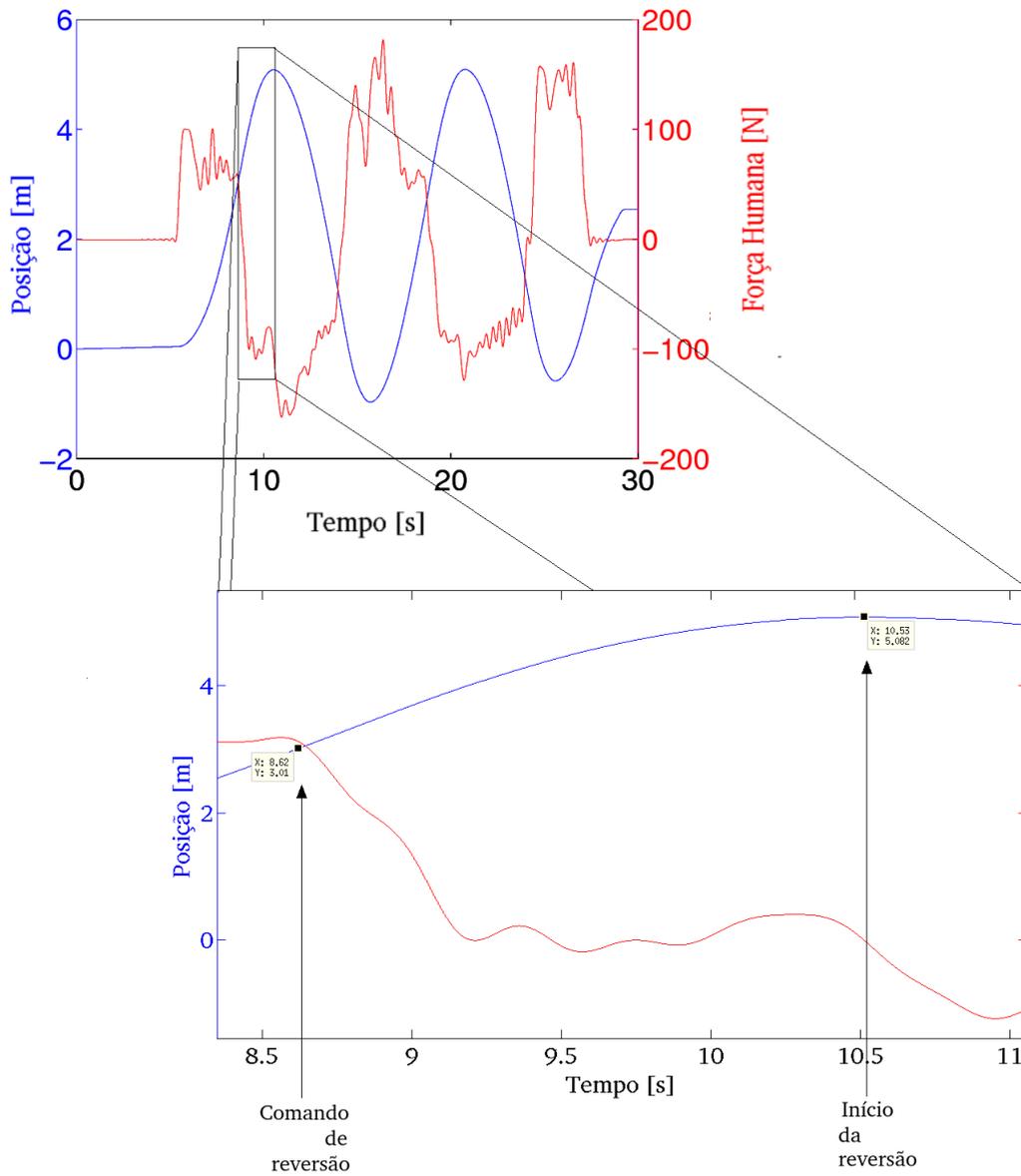


Figura 6.41: Posição e força humana para reversões bruscas com regulação de força constante.

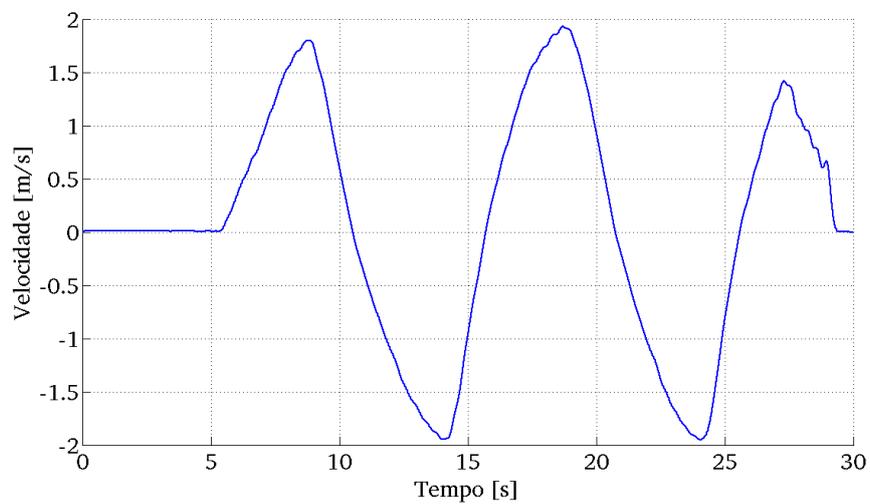


Figura 6.42: Velocidade para reversões bruscas com regulação de força constante.

6.4 Conclusões

No presente capítulo o desempenho do Vecarr foi avaliado mediante operação em todos os possíveis sentidos de movimento atuados pelo acionamento elétrico do veículo, bem como em situações de emergência onde se demanda reversões ou desacelerações bruscas.

Observou-se que os dois modos de operação propostos - regulação para emular impedância mecânica amigável e regulação por força constante - apresentam comportamento dinâmico que favorece diferentes tipos de públicos em diferentes aplicações. A emulação de impedância mecânica amigável faz com que o veículo se comporte de modo super-amortecido, passando ao condutor a sensação de tocar algo flexível, tranquilizante, agradável e com respostas parecidas com a de seres humanos. Nessa abordagem, o deslocamento é suave, porém caso o usuário queira desenvolver velocidades de maior valor absoluto, há a demanda pela aplicação de níveis mais altos de forças. Observou-se que nesse modo de controle o sistema desempenha excelente rejeição de carga, pois exercícios feitos com aproximadamente a mesma força aplicada pelo condutor em superfícies não inclinadas ou inclinadas fizeram com que o veículo se deslocasse na mesma velocidade, tal como aconteceria com a impedância mecânica sendo emulada. Além disso, nesse modo de operação o sistema apresentou um comportamento mais favorável à rejeição de acidentes, uma vez que comandos de reversão aplicados sob alta velocidade de translação levaram à reversão do veículo em uma distância percorrida aproximadamente igual a 34cm.

Para a regulação de força constante, observou-se que o veículo se torna mais atrativo à aplicações onde os condutores demandam maiores velocidades finais sob o mesmo nível de força. Mesmo embora o sistema não restrinja a velocidade final, a aceleração é restrita para que componentes de alta frequência do comando do braço não sejam atendidos, uma vez que as pernas não conseguem responder com a mesma banda passante. Esse comportamento foi verificado nos exercícios realizados. Além disso, o sistema também teve excelente desempenho tanto no rastreamento de trajetórias, seguindo o usuário mediante a dinâmica imposta pelo mesmo, quanto na rejeição de cargas, uma vez que a presença de conjugado gravitacional não demandou maiores níveis de força do condutor para a imposição de uma dada velocidade ao veículo.

Para sintetizar o desempenho do veículo mediante as duas estratégias de controle propostas, apresenta-se nas Tabelas 6.1 e 6.2 os resultados obtidos nos ensaios de operação de rotina e de rejeição de acidentes.

O presente capítulo mostrou por experimentos que o veículo montado obedeceu as premissas do projeto, tendo um comportamento que prestigia a sensação do condutor, a intuitividade

Tabela 6.1: Comparação de desempenho dos controladores para ensaios de rejeição de acidentes (reversões bruscas).

Sentido e inclinação do deslocamento	Controlador	Força humana média em regime permanente	Velocidade média em regime permanente	Fator de multiplicação da força humana (pico)
frontal, plana	Zmec amigável	50N	1,2m/s	2,4
	Força humana cte.	30N	1,9m/s	4
frontal subida, 7,8°	Zmec amigável	60N	1,2m/s	4,5
	Força humana cte.	50N	1,0m/s	5,4
frontal descida, 7,8°	Zmec amigável	20N	0,3m/s	9
	Força humana cte.	12N	0,8m/s	15
reverso, plana	Zmec amigável	60N	1,3m/s	2,1
	Força humana cte.	40N	1,5m/s	3,1
reverso, subida, 7,8°	Zmec amigável	75N	0,65m/s	4
	Força humana cte.	60N	0,85m/s	5
reverso, descida, 7,8°	Zmec amigável	30N	0,6m/s	4,3
	Força humana cte.	20N	0,9m/s	6,6

Tabela 6.2: Comparação de desempenho dos controladores para ensaios de rejeição de acidentes (reversões bruscas).

Controlador	Velocidade no início da reversão	Tempo para início da reversão	Distância percorrida para início da reversão
Emulação de Zmec amigável	1,7 m/s	0,44 s	34cm
Regulação de força humana constante	1,7 m/s	1,9 s	200cm

na condução, a segurança, e a flexibilidade de se atender vários públicos mediante o mesmo *hardware* eletromecânico. A operação do Vecarr mediante a 1^a e 2^a estratégias de controle, juntamente com os resultados apresentados nesse capítulo, resultaram na publicação e na aceitação de dois artigos em congressos internacionais, os quais são apresentados nos apêndices B e D.

Os resultados experimentais desse capítulo também mostraram as limitações do Vecarr, as quais abrem oportunidades singulares para novas pesquisas. Tais oportunidades serão destacadas no próximo capítulo.

Capítulo 7

Conclusões e propostas para trabalhos futuros

O projeto Vecarr até o momento presente apresentou uma vasta gama de trabalhos, os quais compreenderam atividades de pesquisas para entendimento das demandas impostas por pessoas que sejam potenciais candidatos à aplicação da solução, o desenvolvimento de softwares para simulação e para controle do veículo, a montagem do veículo, o projeto do sistema eletrônico embarcado, a apresentação de dois artigos em congressos sendo um deles publicado em revista, o desenvolvimento de cinco trabalhos de conclusão de curso na graduação de Engenharia Elétrica, o desenvolvimento do texto final e o comissionamento do sistema quando as soluções foram integradas. Dentro dessas atividades, podem ser resumidamente pontuadas as seguintes contribuições e avanços:

- a identificação das configurações e forças efetivas típicas impostas por pessoas e elementos externos a um veículo não embarcado por seres humanos e destinado ao transporte de cargas. Tal identificação é resultante de mais de 13 horas de monitoramento de catadores de papel nas ruas de São João del Rei, MG, da avaliação das intenções de mais de 108 pessoas em experimentos como veículo e do processamento de todos esses sinais em plataformas de simulação numérica ou programas para conversão de sinais;
- a caracterização do estado da arte na tecnologia de cooperação homem-robô e na tecnologia para identificação das intenções de movimento de pessoas. Tal caracterização foi feita mediante o estudo crítico de mais de 30 artigos científicos publicados principalmente em congressos e revistas do IEEE. Dessa avaliação, observou-se a possibilidade de se construir tais sistemas baseados em um acionamento à inversor de frequência e motor

de indução, o que torna a solução consideravelmente mais barata e portanto acessível a um maior grupo de usuários;

- a identificação da relevância do trabalho mediante dados estatísticos de estudos relativos aos problemas músculo-esqueléticos de pessoas que trabalham com deslocamento de cargas;
- a concepção dos sistemas de controle que são capazes de regular a dinâmica de um mesmo veículo, porém propiciando diferentes modos operacionais e sensações aos seus condutores;
- a especificação dos elementos de potência do veículo baseada em metodologia desenvolvida na tese, a qual leva em consideração a demanda para cada público específico e resulta em elementos que operam sob a máxima eficiência energética;
- o desenvolvimento da estrutura eletrônica para condicionamento e interface de sinais entre os blocos construtivos do sistema;
- desenvolvimento de uma plataforma de simulação em C++, construída sob o paradigma da orientação a objetos e otimizada à simulação de sistemas que contemplam longos intervalos de tempo e que contenham elementos físicos com constantes de tempo muito baixas;
- o desenvolvimento do *software* de controle embarcado, contemplando a configuração dos elementos de *hardware*, os filtros digitais e as considerações de representação numérica mediante as limitações do processador;
- a montagem do veículo contemplando seus sistemas de tração, sensoramento, transmissão, guidões e acompanhamento dos serviços de usinagem;
- a modelagem do veículo mediante experimentos e pelo uso da plataforma computacional Solid Works;
- a atenuação dos ruídos acoplados e conduzidos presentes nos sinais de controle;
- a apresentação de um artigo no Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente;
- a publicação de um artigo na revista Journal of Control, Automation and Electrical Systems;
- a publicação de um artigo no International Congress of Connected Vehicles - ICCVE 2013/IEEE;

- a produção do presente texto, o qual detalha toda a exploração científica desenvolvida.

O veículo foi montado e controlado sob as duas estruturas de controle apresentadas no capítulo 4. Observou-se que as premissas de projeto foram alcançadas nessa fase, pois o veículo se desloca sob a intenção de movimento do condutor, o qual impõe a velocidade que desejada ao sistema; há multiplicação do esforço do condutor, de tal forma que o seu esforço operando o Vecarr é muito menor que aquele que seria despendido se o usuário deslocasse a carga em seus braços ou em um sistema não motorizado; o veículo pára em superfícies inclinadas sob o comando do usuário e permanece parado, mesmo operando com carga embarcada; há segurança para que o condutor utilize o veículo, uma vez que a dinâmica de resposta do último é compatível com aquela avaliada em suas pernas. Além disso, o atendimento a tais premissas se fez com o veículo tracionado com acionamento elétrico à base de máquina de indução e inversor de frequência, o que caracteriza algo inovador dentro dos sistemas de cooperação homem-robô apresentados na comunidade científica. Acionamentos dessa natureza são aproximadamente 4 vezes mais baratos que os servoacionamentos geralmente empregados em sistemas de cooperação homem-robô. Como as lesões observadas em pessoas que trabalham com transporte de carga se dão em ramos profissionais com restrições orçamentárias severas, a concepção apresentada para o Vecarr irá conjugar contribuições científicas e sociais efetivas.

Para a consecução das demais contribuições do trabalho, propõe-se as seguintes atividades para trabalhos futuros:

- avaliação de desempenho do veículo sobre as duas estratégias de controle para uma maior população de indivíduos que cooperem com o mesmo;
- avaliação ortopédica comparando indivíduos da mesma estrutura física, sendo que parte deles utilizem o Vecarr e a outra parte não utilize;
- avaliação da operação do sistema tendo o banco de baterias como fonte primária de potência mecânica;
- desenvolvimento de um *firmware* de controle de menor custo pela substituição do kit DSP utilizado;
- avaliação da possibilidade de operação do sistema sem encoder para redução sensível de custo;
- aplicação do mesmo *firmware* de controle do Vecarr para um veículo de transporte à pessoas;

- aplicação de um inversor de frequências que só tenha as funções demandadas pelo sistema para redução de custo;
- redução no atrito dos mancais para se vislumbrar a possibilidade de detecção da intenção de movimento do ser humano sem a necessidade de célula de carga. No atual estágio de desenvolvimento, não há como perceber, com boa sensibilidade, variações na corrente do motor ou na variação de velocidade o eixo do motor se um ser humano aplicou intenção de movimento ao veículo. Tal constatação ocorre porque o conjugado de atrito Coulombiano estático dos mancais rejeita o conjugado imposto pelo ser humano, resultando em acelerações nulas quando o mesmo empurra o veículo.
- desenvolvimento de diferentes caçambas dedicadas aos diversos públicos atendidos pelo Vecarr;
- desenvolvimento de um freio mecânico para travamento do veículo em situações de emergência e para reduzir o consumo de energia das baterias quando o Vecarr se encontrar parado e não for necessário frená-lo pelo motor elétrico.
- desenvolvimento de suspensões dedicadas a diferentes aplicações do veículo para que o mesmo se torne apto a operar em qualquer tipo de terreno onde seu condutor precise trafegar;
- desenvolvimento de uma estratégia para regulação da corrente de magnetização do motor onde a última possa variar de acordo com o estado de carga do sistema e assim reduzir aumentar a autonomia do banco de baterias;
- desenvolvimento de uma estrutura para monitoramento do estado energético do banco de baterias;
- desenvolvimento de um painel de baixa massa e com grau de proteção adequado para água e partículas sólidas que possam atingir o sistema eletrônico do veículo;
- aumento do curso de guinada do veículo;
- acionamento automatizado da guinada do Vecarr, de tal forma que esse trabalho não precise mais ser realizado por seres humanos;
- estabelecimento de parcerias com órgãos filantrópicos para distribuição do Vecarr gratuita ou com baixo custo a públicos que não possam adquirí-lo;

Mediante tais considerações, o trabalho será concluído. Destaca-se que toda a base de dados, pacotes computacionais, estruturas eletrônicas de sinais e potência desenvolvidos encontram-se à disposição para apreciação dos interessados mediante contato com os autores do trabalho.

Referências Bibliográficas

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas; *NBR 6601- Veículos rodoviários automotores leves - Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento*; Setembro, 2005.
- [2] ABVE - Associação Brasileira do Veículo Elétrico; <http://www.abve.org.br>
- [3] Amdt, V. ; Rothenbacher, D. ; Daniel, U. ; Zschenderlein, B. ; Schuberth, S. ; Brenner, H. *Construction work and risk of occupation disability: a ten year follow up of 14474 male workers*; Occupational and environmental medicine, volume 62, págs. 559-566. Agosto, 2005.
- [4] Assunção, J. T. ; Geaquinto, H. D. ; *Desenvolvimento de um Algoritmo para Simulação do Motor de Indução Trifásico*; Anais do 12º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA - XII ENCITA, 2006.
- [5] Avolio, E. ; *Uma Contribuição ao Estudo do Comportamento Térmico e do Desempenho Elétrico de Motores de Indução com Rotor em Gaiola*; Tese de Doutorado, Unicamp, 1992.
- [6] Azuaga, Denise; *Danos Ambientais Causados por Veículos Leves no Brasil*; Universidade Federal do Rio de Janeiro; Outubro, 2000.
- [7] Barreto, G.; *Veículo Elétrico à Bateria, Contribuições à Análise de seu Desempenho e seu Projeto; Volumes 1 e 2*; Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Novembro, 1986.
- [8] Battapady, H.; Lin, P.; Fei, D.; Huang, D. ; Bai, O.; *Single Trial Detection of Human Movement Intentions from SAM-Filtered MEG Signals for a High-Performance Two-Dimensional BCI* ; 31st Annual International Conference of the IEEE EMBS, pp. 524-527, Minneapolis, Minnesota, USA. September, 2009.

- [9] Ben-Lamine, M.S. ; Shibata, S. ; Tanaka, K. ; Shimizu, A. ; *Mechanical Impedance Characteristics of Robots for Coexistence with Humans*; Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.907-912. Albuquerque, New Mexico, 1997.
- [10] Blest; *Manual Técnico do veículo Elétrico para Catadores de Materiais Recicláveis*; www.blest.com.br/vec_300.pdf
- [11] Boaventura, W. ; Seixas, P. F. ; *Notas de aula do curso de Processamento de Sinais* ; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 1º semestre, 2010.
- [12] Bose, B. K.; *Power Electronic and AC Drives*; Prentice Hall, 1987.
- [13] Boyali, A. ; Demirci, M. ; Acarman, T. ; Gunvec, L. ; Tur, O. ; Ucarol, H. ; Kiray, B. ; Ozatay, E. ; *Modeling and Control of a Four Wheel Drive Parallel Hybrid Electric Vehicle*; IEEE International Conference on Control Applications, pp 155-162, 2006.
- [14] Brohan, P., et al; *Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850*; Journal of Geophysics, 2006.
- [15] Buller, Stephan; *Impedance-based Simulation Models for Energy Storage Devices in Advanced Automotive Power Systems* . PhD thesis, Aachen University, 2003.
- [16] Cao, H. ; Ling, Z. ; Zhu, J. ; Wang, Y. ; Wang, W. ; *Design Frame of a Leg Exoskeleton for Load-Carrying Augmentation* ; Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp.426-431, Guilin, China, 2009.
- [17] Cardoso, B. J. ; *Notas de aula do curso de Controle de Acionamentos Elétricos* ; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 1º semestre, 2003.
- [18] Cemig; www.cemig.com.br
- [19] Cempre – Compromisso empresarial para reciclagem; *Pesquisa Ciclosoft – Coleta Seletiva Pesquisa Cempre com 237 Municípios*; www.cempre.org.br; 2008.
- [20] Catálogo do inversor de frequência WEG CFW09 <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cfw-09-inversor-de-frequencia-10413064-catalogo-portugues-br.pdf>

- [21] Chabaan, R.; *Torque Estimation in Electrical Power Steering Systems*; VPPC '09 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp.790-797, 2009.
- [22] Chae, K.S.; Park, H.J.; *Evaluation of a 3D Motion Sensor Including Accelerometer and Geomagnetic Sensor*; 16th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication, pp 900-904, Jeju, Korea. August, 2007.
- [23] Choset, W.; Lynch, K.; Hutchinson, S.; Kantor, G.; Burgar, W.; Kavraki, L.; Thrun, S.; *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms and Implementation*; Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [24] Comissão Europeia para Meio Ambiente e Alterações Climáticas;
http://ec.europa.eu/environment/climat/campaign/control/recycle_pt.htm.
- [25] Duchaine, V. ; Gosselin, C. ; *General Model of Human-Robot Cooperation Using a Novel Velocity Based Variable Impedance Control*; IEEE / WHC '07 Proceedings of the Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 446-451, 2007.
- [26] EPA - United States Environmental Protection Agency ; <http://cfpub.epa.gov/eroe/index.cfm?fuseaction=detail.viewMidImg&ch=46&lShowInd=0&subtop=341&lv=list.listByChapter&r=188195#9163>.
- [27] Faias, Sérgio M. R.; *Optimização de Sistema de Propulsão de Veículos para Frotas*; Tese de doutorado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Fevereiro de 2006.
- [28] Fujioka, T.; Shirano, Y.; Matsushita, A.; *Driver's Behaviour Under Steering Assist Control System*; IEEE/IEEEJ/JSIAI International Conference on Intelligent Transportation Systems, pp. 246-251. Tóquio, 1999
- [29] Furnas Centrais Elétricas S.A.; www.furnas.com.br
- [30] Gehrig, D.; Krauthausen, P. ; Rybok, L. ; Kuehne, H. ; Hanebeck, U. ; Schultz, T. ; Stiefelhagen, R. ; *Combined Intention, Activity, and Motion Recognition for a Humanoid Household Robot* ; IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4819-4825, San Francisco, USA, 2011.
- [31] Hansen, J., et al; *A closer look at United States and global surface temperature change*; Journal of Geophysics, 2001.

- [32] Hayt Jr., W. H. ; *Eletromagnetismo, 4ª Edição*; Livros Técnicos e Científicos, 1995.
- [33] Hirata, Y. ; Kosuge, K. ; *Distributed Robot Helpers Handling a Single Object in Cooperation with a Human* ; Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 458-463, San Francisco, USA, 2000.
- [34] Hoang, B.; *Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs)*; IEEE New Technologies, 2009; <http://www.ieee.org/portal/site/emergingtech/index.jsp?techId=1161>
- [35] Holmes, G. ; Lipo, T. A. ; *Pulse Width Modulation for Power Converters* ; Wiley Interscience, IEEE Press, 2003.
- [36] Hui Zhang; Yuzhi Zhang; Jinhong Liu; Jing Ren; Yongjun Gao; *Modeling and Characteristic Curves of Electric Power Steering System* ; PEDS, IEEE, 2009.
- [37] Huo, W.; Wang, Y. ; Wu, J. ; Cheng, L.; *Control of Upper-Limb Power-Assist Exoskeleton Based on Motion Intention Recognition* ; IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2243-2248, Shanghai, May, 2011 .
- [38] Hussein, S.E.; Granat, M.H.; *Intention Detection Using a Neuro-Fuzzy EMG Classifier* ; IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, pp. 123-129. November/December, 2002.
- [39] Iqbal, J. ; Tsagarakis, N. G. ; Caldwell, D. G. ; *A Multi-DOF Robotic Exoskeleton for Hand Motion Assistance* ; 33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS, pp. 1575-1578, Boston, USA, 2011.
- [40] Iscold, P. ; Silva, F.M.A.; *Sistema de Ensaios em Vôos para Aeronaves - CEA-FDAS*; 4º Congresso Temático de Dinâmica, Controle e Aplicações, Unesp, Bauru, 2005.
- [41] Itaipu Binacional; *Itaipu apresenta veículo elétrico para catadores de recicláveis*; Sala de Imprensa, Releases, 26/12/2007. http://www.itaipu.gov.br/?q=node/435&id_noticia=1736;
- [42] Júnior, N. A. ; *Motores trifásicos de indução: Dimensionamento* Revista Integração, USJT, ano XI, no 42, pp. 243-250, 2005.
- [43] Kashiwazaki, K. ; Yonezawa, N. ; Endo, M.; Kosuge, K. ; Sugahara, Y. ; Hirata, Y. ; Kanbayashi, T. ; Suzuki, K. ; Murakami, K. ; Nakamura, K. ; *A Car Transportation*

- System Using Multiple Mobile Robots: iCART II*; IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4593-4600, San Francisco, USA, 2011.
- [44] Kawasaki, H.; Nakayama, K. ; Parker, G.; *Teaching for Multi-Fingered Robots Based on Motion Intention in Virtual Reality* ; IEEE Industrial Electronics Society, pp. 428-433, Nagoya, 2000.
- [45] Kazerooni, H. ; *Human-robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals Part I : Dynamics and Control Analysis* ; Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1632-1642, 1989.
- [46] Kirsch, R.F.; Au, A.T.C.; *EMG-based motion intention detection for control of a shoulder neuroprosthesis*; IEEE Engineering in Medicine and Biology. Proceedings of the 19th Annual International Conference of the IEEE, Volume 5, pp. 1944-1945, 1997.
- [47] Kosuge, T. ; Henrich, D. ; *Human-Robot Cooperation: Safe Pick-and-Place Operations* ; IEEE International Workshop on Robots and Human Interactive Communication, pp. 549-554, 2005.
- [48] Kosuge, K. ; Yoshida, H. ; Taguchi, D. ; Fukuda, T. ; *Robot-Human Collaboration for New Robotic Applications* ; 20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, pp. 713-718, 1994.
- [49] Lianbing, Li; Lin He; Jiang Du; Lin, T.; *An Electric Power Steering System Controller based on Disturbance Observer*; IEEE International Conference on Integration Technology. Shenzhen, China. Março, 2007.
- [50] Meyer, Clarisse Rinaldi; *Implicações Energético-Ambientais de Esquemas de Sucateamento de Automóveis no Brasil*; Universidade Federal do Rio de Janeiro; Março, 2001.
- [51] MNCMR - Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis; *Elementos para Organização da Coleta Seletiva e Projeto dos Galpões de Triagem*; http://www.mncr.org.br/box_3/publicacoes-on-line/Manual\%20Coleta\%20Seletiva.pdf; Novembro 2008.
- [52] Mohan; Undeland; Robbins; *Power Electronics – Converters, Applications and Design*; John Wiley and Sons; 2003.

- [53] Morita, Y.; Yokoi, A.; Iwasaki, M.; Ukai, H.; Matsui, N.; Ito, N.; Uryu, N.; Mukai, Y.; *Controller Design Method for Electric Power Steering System with Variable Gear Transmission System using Decoupling Control*; IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, pp. 3065-3070, Porto, 2009.
- [54] Morita, Y.; Torii, K.; Tsuchida, N.; Iwasaki, M.; Ukai, H.; Matsui, N.; Hayashi, J.; Ido, N.; Ishikawa, I.; *Improvement of steering feel of Electric Power Steering System with Variable Gear Transmission System using Decoupling Control*; AMC '08. 10th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 417-422, Trento, 2008.
- [55] Murphy, J.M.M; Turnbull, F.G.; *Power Electronic Control of AC Motors*; Pergamon Press, 1988.
- [56] Novotny, D.W.; Lipo, T.A.; *Vector Control and Dynamics of AC Drives*; Clarendon Press – Oxford.
- [57] Öberg, T. ; Karsznia, A. ; Öberg, K. ; *Basic Gait Parameters: Reference data for normal subjects, 10-79 years of age*; Journal of Rehabilitation Research and Development. Vol. 30, n. 2, pp 210-223, 1993.
- [58] Opção; *Vivendo do lixo – o outro papel da cidadania*; Goiânia, fevereiro de 2004.
- [59] Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas; www.ipcc.ch
- [60] Park, C. ; Kyung, J. H. ; Park, D. I. ; *Development of an industrial robot manipulator for the easy and safe human-robot cooperation* ; International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 678-681, Gyeonggi-Do, Korea, 2010.
- [61] Parlamento Europeu; *De que tipo de energia precisamos ?*; http://www.europarl.europa.eu/news/public/story_page/051-51877-082-03-13-909-20090316ST051831-2009-23-03-2009/default_pt.htm
- [62] Parmar, M.; Hung, J.; *Modeling and Sensorless Optimal Controller Design for an Electric Power Assist Steering System*; IECON' 02. IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, (Volume:3), pp.1784-1789, 2002.
- [63] Pereira, G. S. ; Torres, L. ; *Notas de aula do curso de Estratégia de Movimento e Controle de Robôs* ; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 1º semestre, 2010.

- [64] Pereira, J. ; Pinto, M. ; Souza, R. ; *Prevalência de lombalgias em transportadores de sacos de café* ; Motriz. Revista de Educação Física, UNESP. Volume 12, no 3, 2006 .
- [65] Peterson, C. ; Kautz, S. ; Neptune, R. ; *Braking and propulsive impulses increase with speed during accelerated and decelerated walking* ; Elsevier, Gait and Posture, pp 562-567, January, 2011.
- [66] Porto, M. ; Juncá, D. ; Gonçalves, R. ; Filhote, M. ; *Lixo, trabalho e saúde: um estudo de caso com catadores em um aterro metropolitano no Rio de Janeiro, Brasil* ; Caderno de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 20a edição. Novembro-Dezembro, 2004 .
- [67] Qiang Li; De-yu Song; Feng Cheng; Li-kang Yang; Ren-hua Cai *A Robust Controller Design for Electric Power Steering System Based on PI Current Loop*; International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, IEEE, 2009.
- [68] Resnick; Halliday; *Physics* ; 4th Edition, 1997.
- [69] Sant´Anna,A.; Wickstrom, N.; *Developing a Motion Language: Gait Analysis from Accelerometer Sensor Systems*; PervasiveHealth 3rd IEEE International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare, pp. 1-8, London, 2009.
- [70] Sepulveda, F.; Meckes, M.; Conway, B.A.; *Cluster Separation Index Suggests Usefulness of Non-Motor EEG in Detecting Wrist Movement Direction Intention* ; IEEE Conference on Cybernetics and Intelligente Systems, volume 2, pp. 943-947, Singapore, December, 2004 .
- [71] Secpower baterias. <http://www.secpower.com.br/2008/index.htm> Catálogo de baterias chumbo-ácido reguladas à válvula.
- [72] 365 dias de sustentabilidade; *Catadores de Papel Lutam por aposentadoria*; <http://365diassustentaveis.wordpress.com/2009/11/22/catadores-de-papel-lutam-por-aposentadoria>;Novembrode2009.
- [73] Santana, V.S. ; Oliveira, R. P. *Saúde e trabalho na construção civil em uma área urbana do Brasil* Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, 20(3):797-811, mai-jun, 2004
- [74] Seabra, L. M. ; Carvalho, J. V.; *Análise, Estudo e Dimensionamento de um Sistema de Propulsão Elétrico à Baterias para Veículo Popular Urbano*; Trabalho de Conclusão de Curso; Fundação Municipal de Ensino Superior de Conselheiro Lafaiete; Janeiro, 2008.

- [75] Silva, L.A.R.; *Controle do Gerador de Indução Duplamente Excitado para Redução do Flicker Proveniente de Oscilações de Potência da Fonte Primária*; Dissertação de Mestrado; Universidade Federal de Minas Gerais; Abril, 2005.
- [76] Silva, L. A. R. ; Rodrigues, L. A. ; Cardoso, B. *Methodology for Specification of Three-Phase Induction Motors Applied to Drive Vehicles Used by Collectors of Recyclable Materials*; Journal of Control, Automation and Electrical Systems. Springer, pp 897-906 outubro/2013.
- [77] Slemon, G. R.; *Electric Machines and Drives*; Addison-Wesley Publishing Company; 1996.
- [78] Smith, T.M., and Reynolds, R.W.; *A global merged land and sea surface temperature reconstruction based on historical observations (1880–1997)*; J. Clim., 2005.
- [79] Tsumugiwa, T. ; Yokogawa, R. ; Hara, K. ; *Variable Impedance Control Based on Estimation of Human Arm Stiffness for Human-Robot Cooperative Caligraphic Task* ; Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 644-650, Washington D.C., USA, 2002.
- [80] United Nations Framework Convention on Climate Change; *Kyoto Protocol Status of Ratification*; outubro, 2006.
- [81] Vale, R. ; *Desenvolvimento de Protótipos de Carrinhos Coletores Motorizados para Coleta Formal e Seletiva de Resíduos Sólidos Urbanos*; Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais; Programa de Auxílio à Pesquisa, CNPq, processo 553661/05-1. 2007
- [82] Walsh, C. ; Pasch, K. ; Herr, H. ; *An autonomous, underactuated exoskeleton for load-carrying augmentation* ; Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1410-1415, Beijing, 2006.
- [83] Weg Motores S.A.; www.weg.com.br
- [84] Wiegman, Herman L. N.; *Battery State Estimation and Control for Power Buffering Applications* . PhD thesis, University of Wisconsin, Madison, United States of America, 1999.

Capítulo 8

Apêndices

8.1 Apêndice A. Artigo publicado na revista *Journal of Control, Automation and Electrical Systems - "Methodology for Specification of Three-Phase Induction Motors Applied to Drive Vehicles Used by Collectors of Recyclable Materials"*

Methodology for Specification of Three-Phase Induction Motors Applied to Drive Vehicles Used by Collectors of Recyclable Materials

Leonardo Adolpho R. Silva, Luiza A. Rodrigues & Braz Jesus Cardoso

Journal of Control, Automation and Electrical Systems
formerly CONTROLE & AUTOMAÇÃO

ISSN 2195-3880

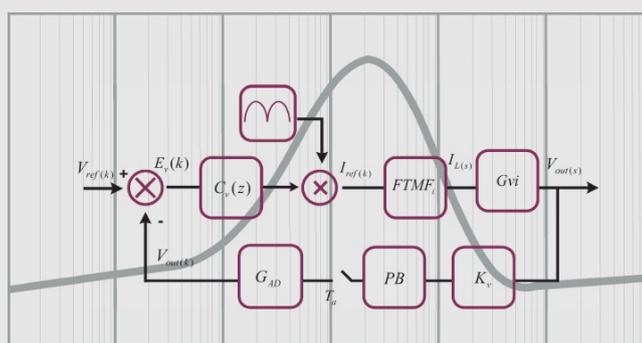
J Control Autom Electr Syst
DOI 10.1007/s40313-013-0076-4



Volume 24 • Number 5

**Journal of
Control, Automation
& Electrical Systems**

Formerly Controle & Automação



Springer
40313 • ISSN 2195-3880
24(5) 585-724 (2013)



Available
online
www.springerlink.com

Your article is protected by copyright and all rights are held exclusively by Brazilian Society for Automatics--SBA. This e-offprint is for personal use only and shall not be self-archived in electronic repositories. If you wish to self-archive your article, please use the accepted manuscript version for posting on your own website. You may further deposit the accepted manuscript version in any repository, provided it is only made publicly available 12 months after official publication or later and provided acknowledgement is given to the original source of publication and a link is inserted to the published article on Springer's website. The link must be accompanied by the following text: "The final publication is available at link.springer.com".



Methodology for Specification of Three-Phase Induction Motors Applied to Drive Vehicles Used by Collectors of Recyclable Materials

Leonardo Adolpho R. Silva · Luiza A. Rodrigues · Braz Jesus Cardoso

Received: 14 April 2013 / Revised: 24 July 2013 / Accepted: 11 September 2013
© Brazilian Society for Automatics–SBA 2013

Abstract This paper presents a methodology for specification of three phase induction motors applied to the traction of vehicles used by recyclable material collectors. In this methodology, it is used a load cell and a GPS to acquire the force and speed imposed by the collectors during actual work journeys. With the adopted approach, it is possible to preview the most efficient motor capable to supply the work cycles demanded by the collectors, avoiding so reduction in motor lifetime by over temperature, an highest electrical energy efficiency and also avoiding the battery bank oversizing. The methodology is expandable to specify electric motors dedicated to substitute the human force in other vehicles whose the human is the primary power source, such as the charts applied by civil construction workers, dockers, farmers or even vehicles for personal transportation like bicycles and scooters. It is highlighted the approach taken to describe the vehicle model referred to the motor axis through vector control and a reduced number of sensors and tests for parameters extraction.

Keywords Electric vehicle · Specification · Motor · Human powered · Collectors · Methodology

L. A. R. Silva (✉) · B. J. Cardoso
Graduate Program in Electrical Engineering, Federal University of Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG 31270-901, Brazil
e-mail: leo.adolpho@gmail.com

B. J. Cardoso
e-mail: cardosob@cpdee.ufmg.br

L. A. Rodrigues
Laboratory of Electrical Machines and Energy Conversion, DEPEL, Federal University of Sao Joao del Rei, Praça Frei Orlando, 170, Centro, São João del-Rei, MG CEP 36307-352, Brazil
e-mail: luiza.rdg@gmail.com

List of Symbols

T_e^*, T_e	Setpoint and actual values for electromagnetic torques
T_L	Load torque
TIM	Squirrel cage three phase induction motor
ω^*, ω	Setpoint and actual motor angular speed
ω_e	Stator supply frequency
s, ω_e	Motor slip
P	Motor number of poles
i_{sq}^*, i_{sq}	Setpoint and actual values for q axis stator current
i_{sd}^*, i_{sd}	Setpoint and actual values for d axis stator current
K_{te}	Torque constant given by T_e/i_{sq}
v_{sd}, v_{sq}	d and q axis stator voltages
L_{ls}, L_{lr}	Stator and rotor leakage inductances
L_s, L_r, M	Stator, rotor and mutual inductances
$\sigma \cdot L_s$	Stator transient inductance given by $L_s \cdot (1 - M^2/(L_s \cdot L_r))$
τ_r	Rotor time constant
r_s	Motor stator resistance
$C_{thermal}$	Motor thermal capacitance
$R_{thermal}$	Motor thermal resistance
$c_{specific}$	Fused steel specific heat
P_{loss}	Motor loss power
$T_{motor, max}$	Maximum allowable motor temperature
T_{motor}, T_{env}	Motor and environment temperatures
m	Motor mass
E	Energy supplied in the motor stator terminals
n_{trans}	Gearbox transmission ration

r_{wheel}	Wheel radius
J	Motor and load moment of inertia

1 Introduction

Accordingly to [MNCMR \(2008\)](#), the collect of recyclable materials in Brazilian cities hire about 800,000 people and, in cities like Belo Horizonte, it allows to recycle 255,000 kg of materials a day. In this way, the activity of recyclable materials collectors contribute for income generation, increasing on lifetime of sanitary landfills, reduction on the load storage on trash zones, reduction on the CO₂ emission, and reduction on demand by big size vehicles which are used to collect trash in urban centers.

The collectors are paid by the mass and type of the collected material. To make an approximate monthly income of US\$500.00, those workers drive typical loads of hundreds kilograms a day, in journeys demanding many accelerations and brakes, as displacements in hilly streets.

Considering their environmental and social relevances, as the physical exhaustive journeys developed by collectors, some research institutes and companies presented, in the last years, projects of vehicles driven by engines or electric motors which are intended to be used by recyclable materials collectors. The Project Recicar, developed at Universidade Federal de Minas Gerais by [Valle \(2007\)](#), lead to the construction of some vehicles which are driven by 5 hp engines. This rated power is based on the peak power demanded in the application, considering no engine overload at any time. Those peak situations occur at hilly streets with 17° of inclination, 500 kg of embedded load, and final speeds of 1.5 m/s. Since this situation rarely occurs, it is possible to substitute the engines by electric motors rated with smaller nominal power but counting on overload capacity during a limited period of time. The company Itaipu Binacional ([2007](#)) developed a electric vehicle to drive the application of recyclable materials collectors of Foz do Iguaçu, Brazil. The motor installed in this drive was rated at 1cv, and the methodology used to specify it is not available in the scientific literature.

Considering that different cities will have different conditions of geography and vehicle's traffic, and considering that different collectors will embed recyclable material at different allocation rates and different final masses, it is not possible to say that a motor rated on 1 cv will respond properly to the demands imposed by collectors at anywhere.

Also for rating a vehicle's motor based on those geographic and operational conditions, the use of torque and power criteria presented by [Júnior \(2005\)](#) does not lead to a correct specification, since small size motors present low mutual inductance, which makes impossible the direct association of losses with the square of torque or the square of

power demanded by the motor. On the other side, criteria based on the maximum torque are not adequate to rate a motor intended to drive applications where the torque peaks are demanded only in short work intervals since this approach would lead to oversized motors. Another way to specify those motors would be to use standard cycles, as the European Urban Drive Cycle presented by [Boyalı et al. \(2006\)](#). In this approach, the standard cycles have limited contribution to choose an adequate motor for the collectors' application, since they describe typical trajectories performed by commercial vehicles in the urban traffic, which does not occur with the collectors because of their frequent stops and absence of coasting times.

Based on the absence of specific standards to select motors to drive the vehicles with the power range demanded by recyclable materials collectors; considering that an under rated motor will not have enough torque to drive the application or it will have reduced lifetime by over temperature; and considering that an over rated motor will operate with low efficiency and so demanding an higher amount of power from the battery bank, this paper presents a complete methodology for choosing three-phase induction motors that are able to drive the collectors' vehicle. To exemplify the methodology, this study presents a scenario where data was collected in actual work journeys. All details related to sensing, parametrization of models and simulation of control structures are presented. It is highlighted that this methodology can be readily applied for any load translational activity where it is desired to substitute the human force by a motor, such as civil construction, agriculture, dockers or even displacement of personal objects.

2 Methodology Description

The methodology developed in this study is intended to help on choosing a commercial motor to drive the vehicle used by recyclable collectors in such a way that the torque currently developed by the collectors will be developed by the motor. There are many candidate motors that could be able to accomplish this task. Those candidate motors have different constructive technologies and an wide range of nominal powers. Based on the severe cost restrictions of collectors, the constructive technology of the candidate motors will be chosen as squirrel cage three phase induction motors (TIM). Between those TIMs, there is a wide range of nominal powers and since it is impossible to buy all candidate motors firstly and choose one of them evaluating their performance later, the candidate motors will be compared through computer simulations developed from consolidated models of the involved equipments and from the torques demanded by the collectors during actual work journeys.

In this study, the methodology to choose the highest performance motor will be based on five criteria, which are described in the next paragraphs.

1st Criteria—motor peak power from datasheets, the TIM maximum available power is approximately three times greater than its nominal power. So the first set of candidate motors will be selected from those whose nominal power is equal to the maximum power demanded by the collectors' vehicle to those motors whose nominal power is 1/3 the maximum collectors' power demand. The application of this criteria is based on the short time duration of the peak power demanded by the collectors and the ability of TIMs to operate in overload for limited periods of time.

2nd Criteria—peak torque demand in order to provide the torques demanded by the collectors at any time, the maximum torque available from each candidate motor has to be greater than the peak torque demanded by the collectors.

3rd Criteria—linearity between torque and current the application demands the vehicle following the mechanical trajectory imposed by its conductor and so the driving motor has to operate under controlled torque. Since the primary power source is a DC battery bank, it has to be used a frequency inverter between the motor and the batteries. To ensure highest performance torque control, this frequency inverter will operate under vector control mode. This operation mode will work properly since the motor operates in the linearity region between the stator torque current and the electromagnetic torque. So, it has to be chosen a motor whose maximum demanded torque is inside the linearity region between the motor available torque and stator torque current.

4th Criteria—temperature limits the electric motor can operate in overload for limited periods of time since its temperature does not exceed the maximum allowable temperature imposed by its insulation class. So, it will be applied a thermal model to evaluate the temperature for each candidate motor operating with the same torque applied by the collectors in their actual work journeys. From this model, it will be rejected the motors whose temperature exceeds the maximum allowable temperature described by their insulation class.

5th Criteria—higher energy efficiency many candidate motors with over-sized specification would be approved under the four previous criteria. But over-sized motors operate with very low efficiency and therefore, to provide a same power demanded by the load, they may extract a much higher power from the batteries. From this issue, to ensure enough battery energy to complete a typical work journey developed by collectors, over-sized motors will demand higher capacity batteries, which are heavier and more expensive. So, between the candidate motors, it will be chosen the one that is able to drive the application consuming the least amount of energy.

The application of those five criteria will lead to the selection of a motor whose torque will be applied to substitute the

currently applied human torque. So it will be described in the next section an experimental setup to measure the torque and mechanical trajectories imposed by the collectors during actual work journeys. After that, those measured torques and speeds will be used as setpoint signals for simulations where the candidate motors will reproduce them. The candidate motor accomplishing all the five criteria will be selected to drive the application.

3 Experimental Setup

3.1 Data Acquisition system

To apply the proposed methodology, it were done measurements in nine work journeys developed by four members of the Association of Recyclable Collectors of São João del Rei, summing up to 11.7 h of data acquisition.

Since in the future the chosen motor will have to provide the same torque and mechanical trajectories currently imposed by the collectors, electronic systems were developed to measure those quantities. The collectors torque can be measured through the force applied by them and by the wheel radius. Since this radius is kept approximately constant during the journeys, the collector's torque measurement was done through their force measurement, which is implemented by a load cell installed in the interface between the vehicle and the collector, as shown in Fig. 1 and emphasized in Fig. 2.

Considering the dynamic coupling between position, speed, and acceleration, it is enough to measure the vehicle speed in order to determine completely its mechanical trajectory. To accomplish this task, the speed information



Fig. 1 Positioning of sensors and electronic setup in one of the monitored vehicles

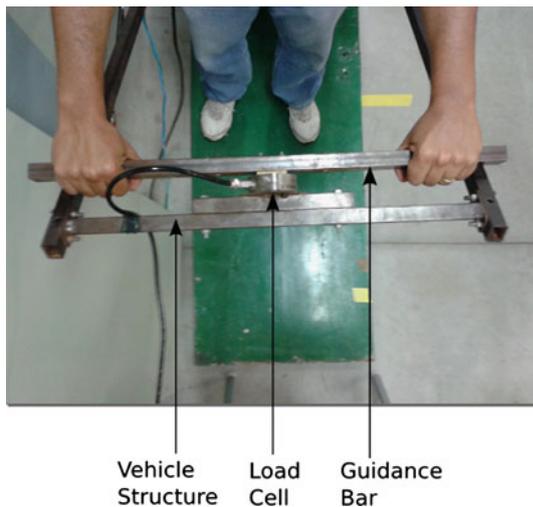


Fig. 2 Load cell mounting scheme in the collectors vehicle

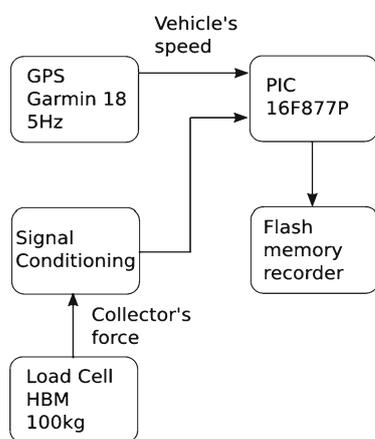


Fig. 3 Sensing, conditioning, processing, and recording units for signal measurement

was extracted from the standard word received by a GPS. This approach is cheaper and much more convenient than the traditional application of encoders or tachogenerators, since the last equipments must be installed on the measured rotating axis and so they demand specific mechanical coupling to ensure axes alignment and leveling. In the case of GPSs, it is necessary only to put them inside the vehicle and also they can be readily transferred from one vehicle to another, as demanded by this experiment. In the present study, the applied GPS works at 5 Hz sampling rate and a speed measurement error of 0.5 cm/s, which are enough for the displacement dynamic and typical speeds developed by humans.

The force and speed signals were sampled and processed by a PIC microprocessor, being afterwards stored in a flash memory. For this task, the Flight Data Acquisition System (FDAS) developed at the Centro de Estudos da Aeronáutica, UFMG, by *Iscold and Silva (2005)* was used. It is pre-

sented in Fig. 3 the block diagram showing the FDAS sensing units, the GPS, the load cell, and the signal conditioning unity, being the last developed by the authors of this study.

4 Parametrization of Applied Models

Since it is not possible to buy all candidate motors to check which of them has the highest performance to drive the collectors' application, the performance of those motors will be evaluated through computer simulations of their dynamic models. The simulation results for each candidate motor will be compared with each other under five criteria. For each criteria is demanded one type of model and those models need a correct parametrization. Those parameters are not available in the technical literature and they will be estimated using methodologies presented in scientific papers and thesis, as methodologies developed in this study that are based in manufacturers catalogs. The models and their parameters will be presented in this section.

The 1st criteria—motor peak power—is implemented through the power trends obtained from the power applied by the collectors on their actual work journeys. This power is calculated by the product between force and speed at each sampling time, and hence it does not need any extra model to be implemented.

The 2nd criteria—motor peak torque demand—is implemented through the measured peak torque in the wheel axis and the datasheet information of maximum available torque in each candidate motor axis. In order to use smaller and cheaper motors, it is usual in vehicles the application of a transmission gearbox, and so the maximum torque in the application will be referred to the motor axis by the gearbox transmission ratio. The transmission ratio will be chosen through the methodology presented by *Boyali et al. (2006)* where the typical speed demanded at the wheel axis is reached when the motor operates close to its nominal speed, since in this region the motor operates with maximum efficiency. Since the measured typical speeds at wheel axis are close to 77 rpm, the tests and simulations with 4, 6, and 8 poles candidate motors will consider transmission ratios of 23, 11, and 9, respectively.

The application of 3rd criteria—linearity between maximum load torque and stator current—can be done through the equivalent TIM circuit in steady state presented in Fig. 4. This circuit demands parametrization, and since it is impossible to buy all the candidate motors firstly and then extract their parameters by locked rotor and no-load tests, those parameters will be estimated using catalog nominal data and the methodology presented by *Assunção and Geaquinto (2006)* and *Almeida (1993)*. Applying those methodologies, it is presented in Table 2 the estimated parameters for the

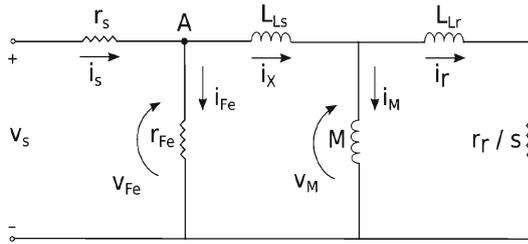


Fig. 4 TIM equivalent circuit in steady state

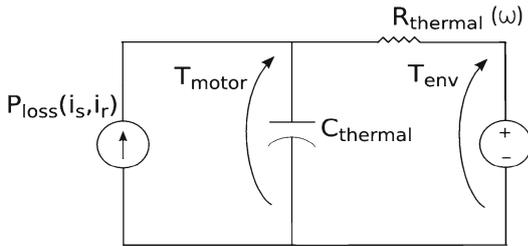


Fig. 5 Equivalent thermal circuit

candidate motors, which are rated at 220 V, 60 Hz, family W21 manufactured by WEG (2011).

The 4th criteria—maximum allowable motor temperature—will be implemented through the thermal equivalent model presented Avolio (1992). This model is shown in Fig. 5, and the motor temperature calculation demands the use of power losses at each operation instant, as well the thermal resistances and capacitances. The thermal capacitance can be obtained from the motor mass and the specific heat of fused steel, as shown at Eq. (1).

$$C_{\text{thermal}} = m \cdot c_{\text{specific}} \quad (1)$$

The thermal resistance is a function of motor geometry and operation speed for self-ventilated motors. Also, this parameter is not available neither on the scientific literature nor on manufacturers data sheets. To overcome this limitation, it is observed from the thermal model presented in Fig. 5 that the thermal resistance can be calculated as shown in Eq. (2) when the motor is under thermal steady state. The maximum temperature will be reached under the maximum allowable power losses for each operation speed.

$$R_{\text{thermal}}(\omega) = \frac{T_{\text{motor,max}} - T_{\text{environment}}}{P_{\text{loss}}(\omega)} \quad (2)$$

The maximum allowable motor temperature is given by the data plate and the environment temperature is considered equal to 40 °C for thermal projects. Since the major mechanism of heat production in electric machines are the stator and rotor copper losses, the maximum allowable power

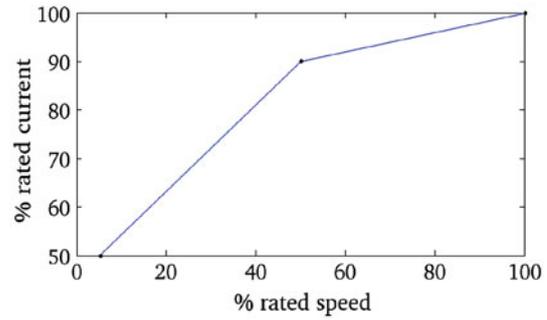


Fig. 6 Overload protection curve implemented by WEG frequency inverters

losses can be estimated as shown in Eq. (3).

$$P_{\text{loss,max}}(\omega) = 3 \cdot (r_s \cdot i_{s,\text{max}}^2 + r_r \cdot i_{r,\text{max}}^2 + r_{Fe} \cdot i_{Fe,\text{max}}^2) \quad (3)$$

Based on Eq. (3), the maximum power losses that will be reached by a motor can be calculated from the maximum allowable stator and rotor currents. The information of maximum allowable currents is available on the protection curves of frequency inverters and the maximum allowable rotor and iron currents can be estimated from the stator current and the equivalent motor circuit shown in Fig. 4. One of those protection curves showing the maximum allowable stator current as function of speed for self-ventilated motors is presented in Fig. 6, and it is reproduced from the WEG CFW11 frequency inverters datasheet (2012). Since one factor that builds the reputation of a frequency inverter manufacturer is the inverter ability to protect itself and the motor, and the mentioned manufacturer is consolidated in the market far from one decade ago, the protection curve of Fig. 6 may be considered reliable.

So, considering the maximum allowable stator currents, the motor speed where those currents are allowed and the parameters for this circuit as shown in Table 1, it is possible to solve the TIM equivalent circuit shown in Fig. 4 and from it to extract the power losses. To solve the circuit of Fig. 4, it is necessary to find the stator frequency at each point of speed and maximum allowable current of Fig. 6. This stator frequency is related to the motor slip as shown in Eq. (4) and the slip at each point of Fig. 6 can be calculated by a root finding algorithm whose the basis is the Kirchhoff's law applied on node A of Fig. 4. The polynomial produced from this node is presented at Eq. (5) and at this study, this polynomial is built assuming constant magnetizing current i_M as it will be imposed on the motor when it gets fed by commercial frequency inverters operating under vector control mode.

$$\omega_e = \frac{P}{2} \cdot \frac{\omega}{1-s} \quad (4)$$

$$i_{s,\text{max}}(s) - i_{fe,\text{max}} - i_{r,\text{max}}(s) = 0 \quad (5)$$

Table 1 Equivalent circuit parameters for candidate TIMs

Motor	r_s (Ω)	r_r (Ω)	L_{ls} (mH)	L_{lr} (mH)	M (mH)	J (kg m^2)
370 W, 4 poles	1.69	4.43	17.59	26.25	201.9	0.0079
370 W, 6 poles	3.92	3.98	18.39	27.44	190.8	0.0024
370 W, 8 poles	4.31	5.16	21.51	32.11	155.4	0.0054
550 W, 4 poles	2.75	4.44	9.92	14.81	155.5	0.00096
550 W, 6 poles	3.24	2.73	10.69	15.95	129.6	0.00328
550 W, 8 poles	4.68	4.79	12.55	18.74	120.9	0.0056
750 W, 4 poles	2.02	1.94	7.87	11.75	186	0.00328
750 W, 6 poles	2.38	2.13	7.85	11.72	131.8	0.0056
750 W, 8 poles	3.44	2.67	9.5	14.17	88.7	0.63

Table 2 Thermal resistances for self-ventilated candidate motors at different speeds

Motor	R_{thermal} @ $\omega = 5\% \cdot \omega_{\text{nom}}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	R_{thermal} @ $\omega = 50\% \cdot \omega_{\text{nom}}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	R_{thermal} @ $\omega = 100\% \cdot \omega_{\text{nom}}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
370 W, 4 poles	2.38	1.49	0.53
370 W, 6 poles	1.29	0.89	0.38
370 W, 8 poles	1.14	0.78	0.35
550 W, 4 poles	1.81	0.80	0.38
550 W, 6 poles	1.27	0.67	0.34
550 W, 8 poles	0.85	0.43	0.23
750 W, 4 poles	1.84	0.96	0.46
750 W, 6 poles	1.41	0.72	0.37
750 W, 8 poles	0.70	0.36	0.20

Through Eq. (5), it is found the motor slip when the maximum stator current is reached at the respective speed given by the protection curve of Fig. 6.

Using the obtained motor slip and speed into Eq. (4), it is calculated the stator frequency. Through this stator frequency and the maximum stator current where this frequency occurs, the equivalent circuit of Fig. 4 can be solved to calculate the maximum power losses at each operation speed, and finally to calculate the thermal resistances at those speeds through the application of Eq. (2). Those thermal resistances for the candidate motors on the three highlighted points of Fig. 6 are presented in Table 2.

For motor speeds different from those presented in Table 2, the thermal resistances are estimated from linear extrapolation or interpolation.

The 4th and 5th criteria—temperature and efficiency evaluation from candidate motors, respectively—demand the characterization of the motors instantaneous operation considering that they are being used to drive the actual journeys developed by the recyclable collectors. Since the collectors torque changes frequently, it has to be used the TIM dynamic model to preview the motor behavior. The motor model used

is presented by Lipo and Novotny (1998), and it is based on the space vector representation of the motor's three phase quantities. This model has as inputs the voltages and frequencies applied by the electrical source and the load torque applied in the motor axis.

To ensure the simulated electromagnetic torque equal to the collectors actual torque, it is used in simulation platform a vector control structure that is the same embedded in commercial frequency inverters and is presented by Lipo and Novotny (1998). This controller has two closed loops, one of them regulates a constant value for the magnetization current, and the other closed loop regulate the stator torque current which is proportional to electromagnetic torque, since the dq reference frame be aligned to the motor rotor flux. To ensure this alignment, the motor slip has to be calculated in the way shown in Fig. 7. In this way, if the controller torque setpoint is equal to the measured collectors' torque, the simulated motor electromagnetic torque will be equal to the collectors' torque. This control structure is shown in Fig. 7.

Besides the electrical interface, the motor model has to receive the load torque in the mechanical interface, as shown by the second Newton's law presented in Eq. (6). The load torque is basically described by three effects: the gravity torque, the rolling and mechanical losses torques and the aerodynamic torque. The aerodynamic torque is proportional to the square of speed and hence it is not relevant for the speeds compatible with the human translational speed observed in the application. The gravity torque depends on the measurement of embedded weight and land inclination where the vehicle moves. The rolling torque depends on the weight and rolling coefficient, which can be extracted from tests where the vehicle in movement is released without driving torque and it is measured the land inclination and vehicle speed. This test is very difficult to be done in the collectors' vehicle, since they have a single axis connected to a single pair of wheels. So, if the collector releases the vehicle to apply zero-driving torque, the vehicle will pitch its front side and falls on the floor. To overcome this limitation, it is observed from the second Newton's law presented at Eq. (6)

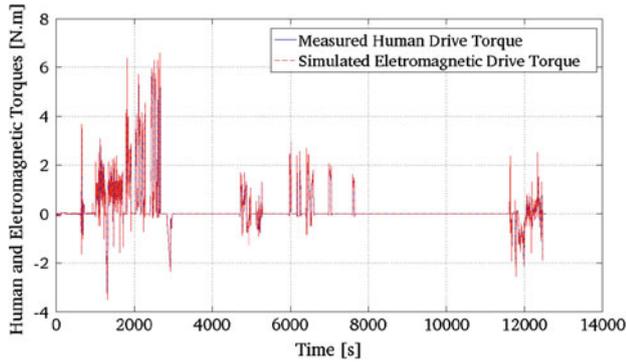


Fig. 9 Measured and simulated driving torques

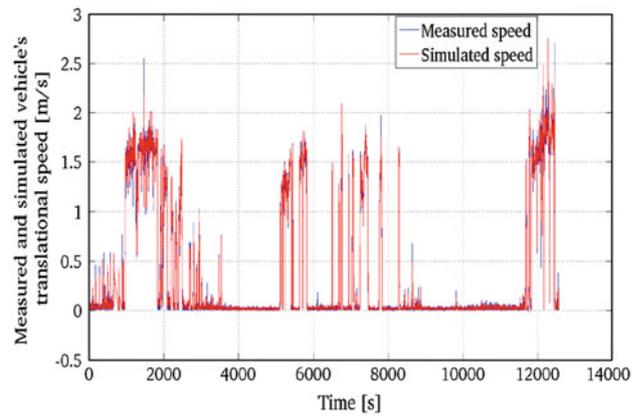


Fig. 11 Measured and simulated speed

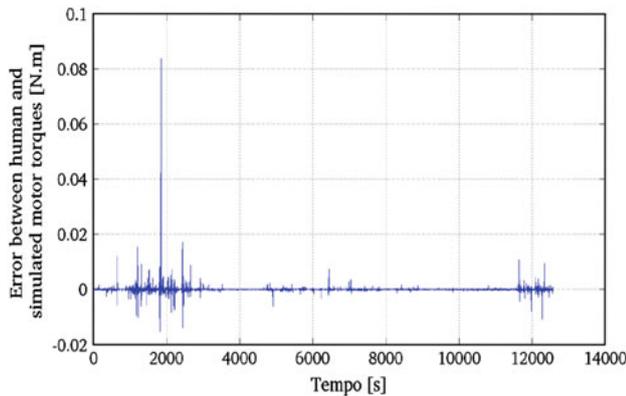


Fig. 10 Error between measured and simulated driving torques

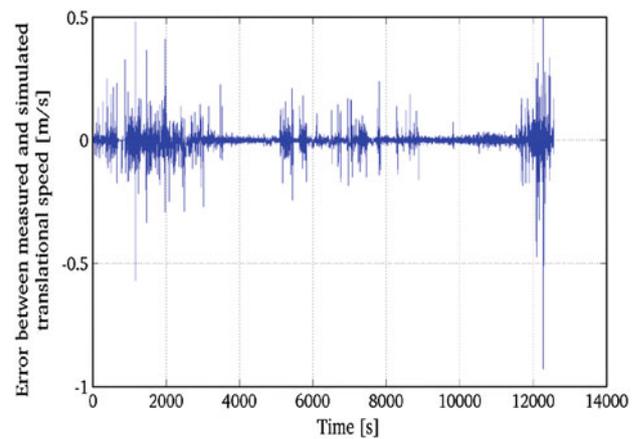


Fig. 12 Error between simulated and measured speed

considering stator voltage limited to their nominal values and operation in transient and steady states.

The 3rd criteria—linearity between stator current and torque —applied through the equivalent circuit of Fig. 4, shows that all candidate motors would be able to provide any demanded torque working inside the linearity region between stator current and torque, as demanded by commercial frequency inverters.

For the next 2 criteria, 81 simulations were done taking into account the analysis of 9 candidate motors—370, 550, and 750 W, with 4, 6, and 8 poles for each power, and all of those motors driving the nine different trajectories that were measured at field. Initially it is evaluated from Figs. 9, 10, 11, and 12 that the simulation results have torque and speed errors around 1–7 %, respectively, when compared to the actual torque and speeds developed by collectors. So the simulation structure presented in Fig. 7 is reliable to reproduce the collectors' journeys, and therefore the conclusions taken from it are reliable to be used in the 4th and 5th criteria.

For the 4th criteria, it is evaluated that none of the candidate motors presented over temperature.

The highest temperature observed was 80 °C, and this was obtained for a 750 W, 8 poles motor operating in a 15,170 s journey, as shown in Fig. 13. Even though the studied motors

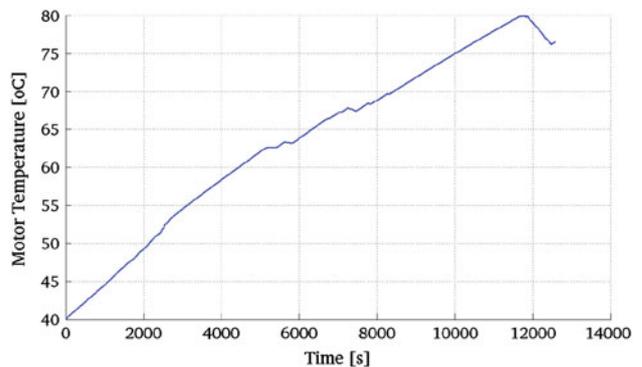


Fig. 13 Temperature profile for maximum temperature obtained from all monitored work journeys

had been exposed to overload torques many times during the journeys and the respective magnetization currents had been applied uninterruptedly to them, so leading to constant heat production, there were many times that collectors stopped. Those situations occur at crossing stops, traffic lights and during material loading on the vehicle. During the stops, the electrical-simulated drive stops the motor as well and there is

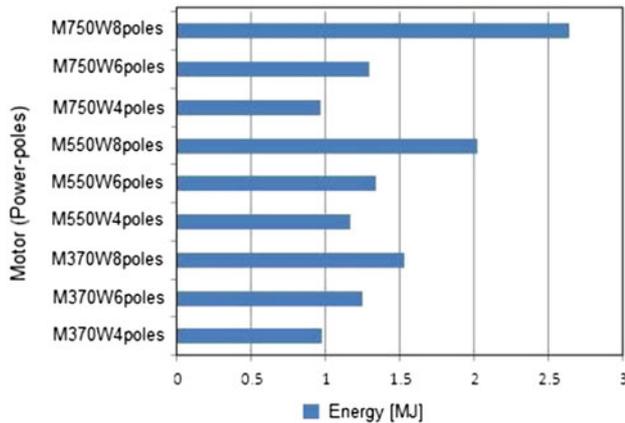


Fig. 14 Total energy consumption by each candidate motor

zero torque demand, which reduces the motor stator current, leading the motor to be cooled.

To complete the motor selection, it is applied the 5th criteria —maximum energy efficiency. To do this evaluation, it is used Eq. (7) to calculate the electric energy consumption through stator terminals of each motor at each measured journey.

$$E = \int 3/2 (v_{sd} \cdot i_{sd} + v_{sq} \cdot i_{sq}) \cdot dt \quad (7)$$

The summation of the energy consumption from each motor in the 9 measured journeys is presented in Fig. 14.

As shown in Fig. 14, the most energy efficient motors to the work journeys developed by the recyclable material collectors from São João del Rei are the 370 and 750 W, both in 4 poles. Compared to the 1 cv motor rated in Itaipu project (2007), the 370 W is able to supply the collectors' demands and it has the advantage of a lower mass and a lower acquisition cost. Based on this conclusion, the 370 W, 4 poles, 220 V motor is selected as the most adequate one to substitute the human force applied to drive the recyclable collectors' vehicle, developing the same torques and trajectories currently imposed by the São João del Rei's collectors.

6 Paper Contributions

This paper presents a complete methodology dedicated to select a motor that could substitute the human force applied to drive vehicles intended to move loads in translational displacements. The proposed methodology suppress the absence of specific standards and scientific papers designed to specify motors inside the 1 cv power range, applied to drive a non-periodical load and supplying duty cycles imposed by humans interacting with a vehicle. The methodology covers issues related to the compatibility between load torque and

motor torque availability, motor temperature, control requirements when the motor gets fed by a frequency inverter and also electric energy efficiency. All of those considerations ensure that the selected motor will be able to supply the mechanical load, without reduction in its lifetime, being able to have controlled torque and requiring the minimum amount of embedded battery, optimizing so the acquisition and maintenance costs. In this way the present study contributes with the most adequate traction equipment to help increasing the collectors' health as increasing the possibility of an higher income and also reducing the demand of big size vehicles moving at urban traffic.

The methodology is based on the knowledge of the user's typical work cycles. Those cycles are characterized by measurements of force and speed, which are made through load cell and GPS, respectively. Therefore, the methodology input data is available through a reduced number of non-expensive sensors. The transfer of those sensors from one tested vehicle to other is easily done, since they do not require sophisticated mechanical couplings and leveling. This functionality enables to measure more conveniently an higher population of workers that could be benefited from a motor driven vehicle, reducing so the probability of errors in the motor specification. Also this approach could be implemented to select the highest performance motor that is able to drive other vehicles currently driven by human force, such as bicycles. In case of bicycles, for example, the load cell could be installed at pedal to measure the force transmitted by its conductor and the GPS only needs to be attached at some point of bicycle structure to measure its speed. From those two measurements, the methodology presented at this paper could be used to specify a motor dedicated to drive the bicycle. As another example, the same methodology could be done to specify a motor dedicated to drive a scooter, if the load cell is installed at the conductor's shoes and it is measured the force done when its conductor pushes the floor.

It is highlighted as another contribution from this paper, the innovative approach to model the vehicle referred to the motor axis, i.e., the mechanical load. This approach is implemented through computer simulation of a vector control structure and the TIM space vector model. The simulation package takes as inputs only the GPS and load cell measurements, suppressing so specific tests and sensors to extract coefficients related to two load torque components presented in a vehicle, i.e., the aerodynamic and rolling friction load torques, as dispensing the on-line measurement of mass and land inclination to describe the gravity load torque. Therefore, the proposed approach can be used in other researches, where it is necessary to represent the vehicle total load referred to the motor or engine axis and using a reduced number of sensors and tests.

The parameters of many models used through the methodology are not available in the scientific literature and all

of them are clearly presented and ready for use in other researches involving the same equipments.

In multidisciplinary issues, this study contributes through the produced database of force and speeds developed by the recyclable materials collectors that could be used by physiotherapists, orthopedists, and physical educators. Also the positioning data saved from GPS permits the determination of the paths taken by recyclable collectors during their work journeys. This information can be used by government secretaries in management, tracking, and planning activities related to collection of recyclable materials in the city.

7 Conclusions

The methodology presented at this paper is a tool for the design of an electric drive that substitutes the human force in vehicles, whose primary power source are humans, such charts applied in the activities of recyclable collectors, civil construction workers, dockers, farmers, and loaders in warehouses. The construction of those electric vehicles demand the specification of an electric motor and this specification needs to point a motor that is able to provide the load torque demand, as it can not have its lifetime reduced by over temperature, it has to be able to operate with controlled torque and also it has to operate with maximum efficiency in order to reduce the battery bank size. All of those issues are clearly presented at the methodology developed in this study. By the reduced number of sensors needed to provide input data for this methodology and by the fact that those sensors does not need sophisticated installation, the methodology can be readily applied to any vehicle whose the human be the primary power source. To exemplify the application of the methodology, it is shown the specification of a motor intended to drive the vehicles used by recyclable material collectors of Sao Joao del Rey, Brazil.

Acknowledgments The authors acknowledge the support received from the Centro de Estudos da Aeronáutica, UFMG, by the valuable contribution related to the use of the data acquisition system—CEAFDAS—and to the Collectors Association of São João del-Rei whose members dedicated indispensable contribution during the field data measurement and provided rich information about their way of work.

References

- Almeida, A. T. L. (1993). A contribution to energy efficiency and maintenance of squirrel cage three phase induction motors (PhD Thesis, UNICAMP, 1993).
- Assunção, J. T., & Geaquinto, H. D. (2006). Development of an algorithm for simulation of three phase induction motors. In *Annals of 12th Scientific Initiation Meeting and Graduation of ITA-XII ENCITA*, 2006. Sao Jose dos Campos, Brazil: Institute of Aeronautic Technology.
- Avolio, E. (1992). A contribution for evaluation of thermal behavior and electrical performance of squirrel cage induction motors (PhD Thesis, UNICAMP, Brazil, 1992).
- Boyalı, A., Demirci, M., Acarman, T., Tur, O., Uçarol, H., & Kiray, B. (2006). Modeling and control of a four wheel drive parallel hybrid electric vehicle. In *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications*, Munich, Germany.
- Iscold, P., & Silva, F. M. A. (2005). System for flight tests in airplanes CEA-FDAS. In *4th Thematic Congress in Dynamics, Control and Applications*. Bauru, Brazil: UNESP.
- Itaipu Binacional (2007). Itaipu apresenta Veículo Elétrico para Catadores de Recicláveis; Sala de Imprensa, Releases. http://www.itaipu.gov.br/?q=node/435&id_noticia=1736.
- Júnior, N. A. (2005). Three phase induction motors: Rating. *Integração Magazine*, Vol. 42, pp 243–250, Universidade São Judas. ftp://ftp.usjt.br/pub/revint/243_42.pdf.
- Lipo, T. A., & Novotny, D. W. (1998). *Vector control and dynamics of AC drives*. Oxford: Clarendon.
- MNCMR (2008). National Movement of Recyclable Materials Collectors. Elements for selective collection organization and design of separation facilities. <http://www.mncr.org.box/box3/publicacoes-on-line/Manual%20Coletal%20Seletiva.pdf>.
- Valle, R. M. (2007). Development of prototypes of engine driven vehicles for formal and selective collection of urban solid residues. Final Report, Dept. of Mechanical Engineering, Federal University of MinasGerais. <http://www.coletasolidaria.gov.br/menu/noticias/estudantes-da-ufmg-desenvolvem-carrinho-para-catador-de-papel/>.
- WEG (2011). Selection of electric motors— W21 high efficiency motors. <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cfw-11-programming-manual-0899.5620-3.1x-manual-english.pdf>.
- WEG (2012). Programming Manual CFW11 Frequency Inverter. <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cfw-11-programming-manual-0899.5620-3.1x-manual-english.pdf>.

8.2 Apêndice B. Artigo publicado no congresso IEEE IC-CVE2013 - *International Congress on Connected Vehicles 2013 - "Human-Robot Cooperation System with Mechanical Impedance Control for Friendly Human Perception"*

Human-Robot Cooperation System with Mechanical Impedance Control for Friendly Human Perception

Leonardo Adolpho Silva , Braz de Jesus Cardoso
Graduate Program in Electrical Engineering
Federal University of Minas Gerais
Belo Horizonte, MG, Brazil
leo.adolpho@gmail.com , braz.cardoso@ieee.org

Fabrcio Pacheco Pujatti
Department of Mechanical Engineering
Federal University of Minas Gerais
Belo Horizonte, MG, Brazil
pujatti@demec.ufmg.br

Abstract—Many professional or daily activities require load displacement by human arms or human powered vehicles. Those activities may lead to muscle-skeleton diseases in load-carrying professionals as in people carrying their personal belongs. To help prevent those injuries, the scientific community has developed human-robot cooperation systems which are implemented through a robot that works as a force multiplier equipment and the human that works as the positioning or force setpoint generator. In order to provide the force multiplication feature and also to care about the human perception during the cooperative task, this paper presents the design and implementation of a robot that is dedicated to help in translational displacements while emulating an active mechanical impedance that provides a friendly perception to humans.

Keywords—human; robot; cooperation; electrical; vehicle; mechanical; impedance; friendly; perception

I. INTRODUCTION

Many professional or daily activities require load displacement by human arms or human powered vehicles. Those tasks are developed, for example, by dockers, civil construction workers, farmers, load carriers in industrial facilities or collectors of recyclable materials. In all of those jobs, there are an high amount of muscle-skeleton diseases and, consequently, government expenses due to disability pensions. One way to prevent those injuries is through the use of a robot that multiplies the human force while following the trajectory setpoint defined by an interfacing human [2],[3]. Even though the published developments are effective to multiply the human force and prevent muscle-skeleton diseases, they do not explore the human perception during the cooperative tasks.

This perception has direct influence over the safety and stress levels appreciated by humans during cooperative tasks implemented with robots. To reach a friendly human perception during cooperation with robots, the robot has to develop the same mechanical trajectories that would be developed by some selected mass-damper-spring systems which could receive the same human force applied over the actual robot. Those selected mechanical impedances are considered friendly if they can provide a simultaneous human perception of touching something reassuring, flexible, pleasant and human-alike, as presented by Ben-Lamine *et al* [1]. So, in this study, the friendly human perception will be classified under the mentioned adjectives and it will be presented a robot

built to move 500 kg net loads, driven through a cost effective approach by the use of induction motor and frequency inverter, preserving the human natural conduction mode and emulating a mechanical impedance capable of transmitting a friendly cooperation perception.

II. ROBOT SETUP

A. Mechatronic System Description

The mechanical structure and power elements were designed to aid in translational displacements of 500kg net load. The power drive is implemented by a 1.5hp, 220V, three-phase induction motor; a 23.4:1 double-stage transmission system; a 8,0A/220V vector controlled frequency inverter. The human commands are sensed by a 1300N side effort compensated load cell. The control software is executed by a fixed-point DSP and a frequency inverter. The complete system is shown at Fig. 1.

III. CONTROL SYSTEM DESIGN

A. Controller structure

The system provides a friendly perception to the cooperating human in translational displacements. To do so, the robot receives the human force and it simulates in real-time a friendly mechanical impedance with M-b-k characteristics as presented by Ben-Lamine *et al* [1]. From this simulation, it's obtained the speed of the emulated mechanical impedance and this signal is used as the setpoint for the actual robot. The control system is presented at Fig. 2.



Fig. 1 Structure and mechanical traction system

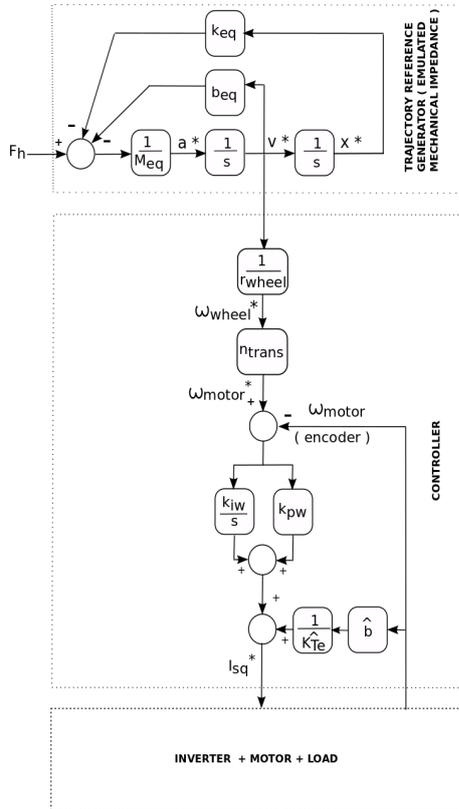


Fig. 2. System block diagram

IV. RESULTS

The friendly perception effectiveness can be proved from the error between the speed of the friendly emulated mechanical impedance and the speed of actual vehicle when both receives the same human force. Also, it's convenient to evaluate the system effectiveness through the ratio between the demanded human force to move the robot when the electrical drive is enabled and disabled. The signals related to those features were acquired in experiments where the robot transported a 118.5kg total mass while emulating a mechanical impedance of 8kg, 50N.s/m and 0N/m [1]. The spring coefficient was taken as 0N/m because otherwise it would be demanded a higher force from the person when the distance increases and also because Duchaine *et al* [4] showed that this parameter is insignificant for the human perception. For this emulating condition, it's presented at Fig. 3 the system performance for a 13.0m non-inclined surface displacement. Also, it's presented at Figs.4 and 5 the system performance for an 15.2 upward displacement over a 7.82° inclined surface .

V. CONCLUSIONS

The human-robot cooperation system presented and built for this study is able to move a 118.5kg total mass providing to the interfacing person the sensation of moving an 8kg,

50N/(m/s) mechanical impedance. For upward movements, the human force multiplication reached a peak of 40 times.

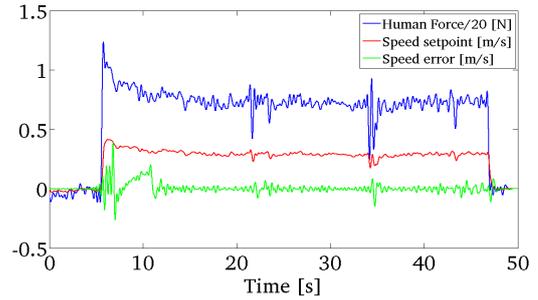


Fig. 3. Performance for non-inclined surface displacement

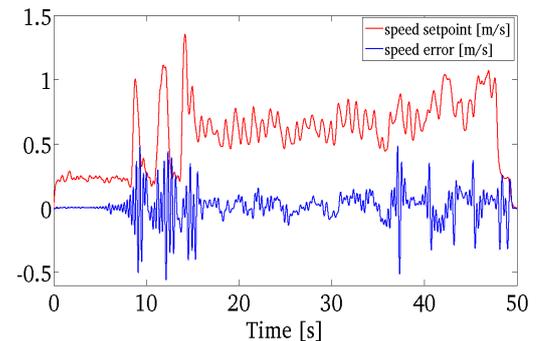


Fig. 4. Speed error for upward displacement

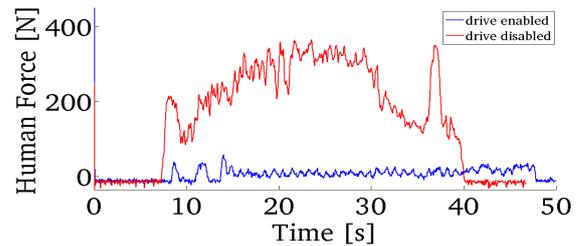


Fig. 5. Human forces for upward displacement

Acknowledgments

This work has been supported by the brazilian agency CAPES.

REFERENCES

- [1] M.S. Ben-Lamine, S. Shibata, K. Tanaka, A. Shimizu , " Mechanical Impedance Characteristics of Robots for Coexistence with Humans" Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.907-912. Albuquerque, New Mexico, 1997.
- [2] K. Kashiwazaki, N. Yonezawa, M. Endo, K. Kosuge; Y. Sugahara; Y. Hirata, T. Kanbayashi, K. Suzuki, K. Murakami, K. Nakamura, "A Car Transportation System Using Multiple Mobile Robots: iCART II", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4593-4600, San Francisco, USA, 2011.
- [3] Y. Hirata, K. Kosuge, "Motion Control of Distributed Robot Helpers Transporting a Single Object in Cooperation with a Human", IEEE/ICRA International Conference on Robotics and Automation, pp.3010-3015, vol.3, 2001.
- [4] V. Duchaine and C. Gosselin "General Model of Human-Robot Cooperation Using a Novel Velocity Based Variable Impedance Control", IEEE/WHC, 2007.

8.3 Apêndice C. Artigo publicado no SBAI 2011 - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - *"Metodologia para Especificação de Motores de Indução Trifásicos para Tração de Veículos Utilizados por Catadores de Resíduos Recicláveis"*

METODOLOGIA PARA ESPECIFICAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS PARA TRAÇÃO DE VEÍCULOS UTILIZADOS POR CATADORES DE RESÍDUOS RECICLÁVEIS

LEONARDO ADOLPHO R. SILVA¹, LUIZA A. RODRIGUES¹, BRAZ JESUS CARDOSO².

1. *Laboratório de Máquinas e Conversão da Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando, 170, Centro, sala 2.21 DEPEL, CEP 36307-352 São João del-Rei, MG, Brasil*
E-mails: leonardo@ufsj.edu.br, luiza.rdg@gmail.com

2. *Laboratório de Aplicações Industriais, Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, Escola de Engenharia, sala 2832, CEP 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil*
E-mail: cardosob@cpdee.ufmg.br

Abstract— This paper presents a methodology to specify three phase induction motors applied to the traction of vehicles used by recyclable material collectors. In this methodology it is used a load cell and a GPS to acquire the force and speed that were imposed by the collectors during real work journeys. With the adopted approach, it is possible to preview the most efficient motor capable to supply the work cycles demanded by the collectors, avoiding so the battery bank oversizing and consequently an higher cost to recharge them. The methodology is extendable to other systems used to translate embedded loads and tracted by electric motor. It is highlighted the use of vector control to reproduce the load torque through a reduced number of sensors and parameter acquiring tests.

Keywords— electric vehicle, induction motor, specification, efficiency, vector control, collectors, recyclable

Resumo— Este estudo apresenta uma metodologia para especificação de motores de indução trifásicos destinados a tração de veículos utilizados por catadores de resíduos recicláveis. Nesta metodologia são utilizados célula de carga e GPS para aquisição de sinais e força e velocidade impostas por catadores em jornadas reais de trabalho. Com a abordagem adotada, é possível obter o motor mais eficiente possível que atenda ao regime de trabalho dos catadores, evitando-se assim o sobredimensionamento do banco de baterias necessário a aplicação e o consequente aumento no custo de recarga das mesmas. A metodologia é extensível à qualquer outro sistema de translação de cargas embarcadas com tração à motor elétrico. Destaca-se a utilização do controle vetorial para reprodução do conjugado de carga através de um número reduzido de sensores e ensaios.

Palavras-chave— veículo elétrico, motor de indução, especificação, eficiência, controle vetorial, catadores, recicláveis

Lista de símbolos

T_e^* , T_e - referência e valor real de conjugado eletromagnético do motor
 T_{mec} - conjugado de carga do motor
 i_{sq}^* , i_{sq} - referência e valor real de corrente de estator em eixo q do motor
 i_{sd}^* , i_{sd} - referência e valor real de corrente de estator em eixo d do motor
 v_{sd} , v_{sq} - tensões de estator em eixos d e q
 ω_e - frequência de alimentação do estator
 ω_r - velocidade angular do motor
 s_{we} - escorregamento do motor
 L_s , L_r - indutâncias de estator e rotor do motor
 M - indutância de magnetização do motor
 σ - constante dada por $L_s(1 - M^2)/(L_s L_r)$
 T_r - constante de tempo do rotor
 $C_{termica}$ - capacitância térmica do motor
 $R_{termica}$ - resistência térmica do motor
 $C_{especifico}$ - calor específico do ferro fundido
 P_{perdas} - potência de perdas do motor
 T_{max} - temperatura média máxima suportada pelo motor de acordo com sua classe de isolamento
 T_{motor} , $T_{ambiente}$ - temperaturas do motor e do ambiente
 m - massa do motor
 MIT - motor de indução trifásico

1 Introdução

Segundo o MNCMR (2008), a coleta de resíduos recicláveis nas cidades brasileiras emprega cerca de 800 mil pessoas e, em cidades como Belo Horizonte, viabiliza a reciclagem de 255.000kg de material por dia. Desta maneira, a atividade de catadores de resíduos recicláveis contribui para geração de renda, aumento de vida útil de aterros sanitários, redução da carga depositada em zonas de despejo, redução da emissão de CO₂ na atmosfera e redução da demanda por veículos de grande porte para coleta de lixo nos centros urbanos.

Os catadores que desempenham esta atividade são pagos por quilograma de material coletado e pelo tipo de material. Para garantir uma renda média aproximada de dois salários mínimos, estes trabalhadores tracionam cargas típicas de centenas de quilogramas por dia, em ciclos de trabalho que demandam acelerações e frenagens constantes, bem como o deslocamento em morros.

Pelas relevâncias ambiental e social, bem como pela demanda física exaustiva imposta aos catadores, alguns institutos e empresas apresentaram nos últimos anos projetos para implantar tração motorizada aos

veículos de catadores de papel. O projeto Recicar, desenvolvido pelo departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais por Valle(2007), levou à concepção de alguns veículos para catadores de papel com tração baseada em motores à combustão. Neste projeto foi especificado um motor de 5cv, o qual é dimensionado para o pico de potência demandada pelo catador. Este pico ocorre para deslocamento em morros de 17º de inclinação, com 500kg de carga reciclável embarcada e velocidade nominal de 1,5m/s. Como esta situação ocorre esporadicamente na atividade dos catadores, é possível especificar motores para este trabalho com menor capacidade nominal, porém com capacidade de sobrecarga. Esta condição é atendida por motores elétricos. As empresas Itaipu (2007) desenvolveu um veículo para catadores de resíduos recicláveis com tração baseada à máquina elétrica. O veículo foi equipado com motor elétrico de 1cv e a metodologia de especificação do mesmo não está disponível na literatura científica.

Considerando o relevo, taxa de deposição de carga, massa embarcada e condições de trânsito de diferentes cidades brasileiras, não é possível afirmar que um motor de 1cv atenda às demandas de catadores de papel de todo país. A utilização de critérios de conjugado e potência, tal como previsto por Júnior(2003), também não leva ao dimensionamento adequado para esta atividade, uma vez que são demandadas potências máximas de 0,7cv e os motores nesta faixa de potência possuem baixa indutância de magnetização, o que inviabiliza associar as perdas com o quadrado do conjugado ou com o quadrado da potência demandados pelo processo. Em um outro extremo, critérios de conjugado máximo também não são adequados para selecionar um motor adequado à atividade de catadores, uma vez que os picos de conjugado são demandados durante intervalos muito curtos de trabalho, o que levaria, portanto, a motores sobredimensionados. Destaca-se também que perfis padronizados de velocidade, tal como o European Urban Drive Cycle apresentado por Boyali (2006), possuem contribuição limitada para a especificação do motor adequado à aplicação de catadores de papel, uma vez que os ciclos contemplados nessas normas se relacionam à veículos que se deslocam em ciclos típicos ao trânsito urbano, o que não ocorre com os veículos de catadores de resíduos recicláveis, uma vez que as paradas para coleta de material são mais frequentes e não há período de costeamento. No intuito de suprir tais limitações, este estudo apresenta uma metodologia para especificação de motores de indução aplicáveis à atividades de catadores de resíduos recicláveis, e que utilize dados reais coletados em jornadas de trabalho desenvolvidas pelos mesmos.

2 Descrição do Experimento

2.1 Sistema de aquisição de dados

Para aplicação da metodologia proposta neste estudo, foram feitas medições em 13 jornadas de trabalho reais desenvolvidas por 4 membros da Associação de Catadores de São João del Rei, totalizando 11,7 ho-

ras de aquisição. Nestas medições foram adquiridos sinais de velocidade do veículo e força imposta pelo catador. Estes sinais foram amostrados e tratados por um microprocessador PIC, sendo posteriormente armazenados em uma memória flash. Para esta tarefa foi utilizado o *Flight Data Acquisition System (FDAS)* desenvolvido no Centro de Estudos da Aeronáutica da UFMG por Iscold *et al*(2005). As unidades de sensoriamento do FDAS utilizadas neste experimento, bem como a estrutura da célula de carga e sua unidade de condicionamento, desenvolvidas pela equipe do projeto, são ilustradas na figura 1.

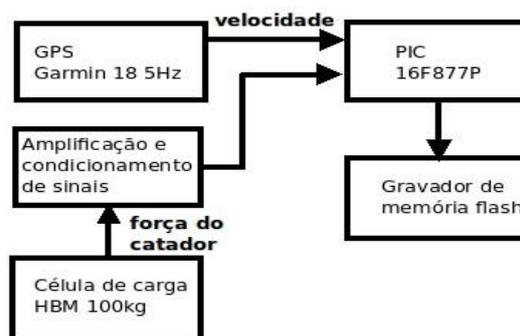


Figura 1. Unidades de sensoriamento, condicionamento, processamento e gravação de sinais

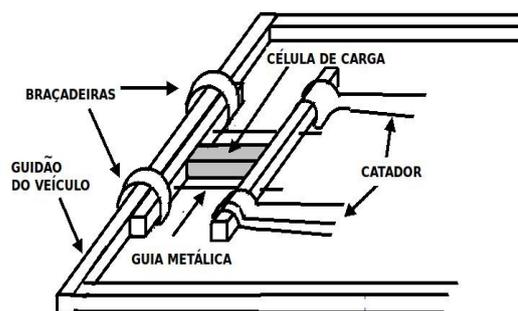


Figura 2. Ilustração da montagem da célula de carga no veículo do catador

A força aplicada pelo catador foi obtida por uma célula de carga com capacidade nominal de 100kg, cuja representação de montagem é apresentada na figura 2. Tal como mostrado na figura 1, foram também empregados um GPS com precisão de 0,5cm/s para medição de velocidade.

2.2 Modelagem proposta

Através da medição do GPS, observou-se que a velocidade angular de cruzeiro na roda do veículo é de 77 rpm. Como esta velocidade é muito menor que velocidade nominal de MITs de prateleira, há a necessidade de se utilizar redutora mecânica. Para escolha da redutora, adotou-se a metodologia proposta por Hofman(2005), o qual sugere que, na região de máximo consumo de potência pela carga, a redução leve o motor à operar na sua região de eficiência máxima. Desta abordagem, conclui-se que a razão ótima

de redução para motores de 4, 6 e 8 pólos é dada por 20, 11 e 8, respectivamente.

Pelos sinais de força e velocidade, obtidos pelas célula de carga e GPS, respectivamente, foi calculada a potência instantânea em todos os dias de atividade, obtendo-se um valor máximo de 460W, tal como mostrado na figura 3. Assim sendo, o primeiro conjunto de motores selecionado foi extraído do catálogo WEG(2009) e contempla máquinas de 250W, 370W, 550W e 750W.

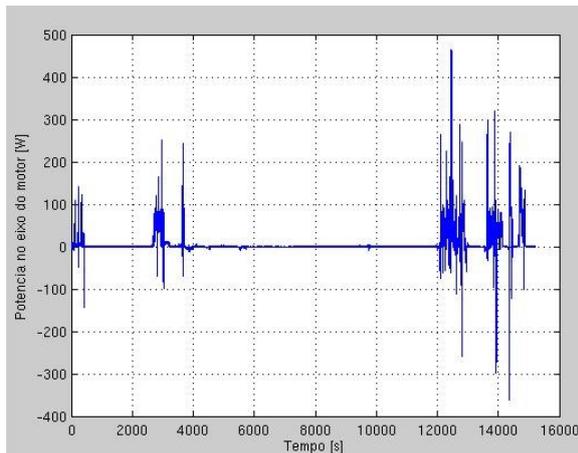


Figura 3. Potência x tempo para o dia de máxima potência medida

Considerando os motores selecionados no critério de potência e as respectivas razões de transmissão, foram selecionados os motores cujo conjugado máximo obtido na região linear entre conjugado e corrente fosse maior que o conjugado de pico da aplicação. Com a adição deste critério, restaram os motores de 370W, 550W e 750W, com 4,6 e 8 pólos.

Para os últimos motores selecionados, avaliou-se quais eram capazes de realizar o trabalho de tração dos catadores sem exceder o limite de temperatura previsto em sua classe de isolamento. Para o cálculo da temperatura, foi utilizado o modelo térmico equivalente da máquina, proposto por Avolio (1992), o qual é apresentado na figura 4.

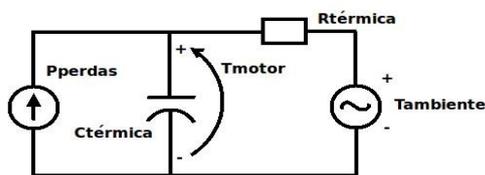


Figura 4. Modelo térmico da máquina

Tal como mostrado na figura 4, o cálculo da temperatura demanda a utilização da potência de perdas em cada instante de operação. Para estimar esta potência foi simulado, para cada motor em cada trajeto de aquisição, um sistema em malha fechada contendo o respectivo motor acionado por um controlador vetorial indireto, tal como proposto por Lipo (1998), o qual garante, no motor simulado, o mesmo conjugado medido nas tarefas dos catadores. Além disso, utilizou-se uma malha fechada para estimar o conjugado de carga, de forma a garantir, na simulação, a

mesma velocidade medida na tarefa dos catadores. A estrutura do sistema de simulação é mostrado na figura 5.

Garantindo-se na simulação os mesmos conjugado e velocidade medidos em campo, garante-se que a potência transferida à carga na simulação é igual àquela medida em campo. Para obter a potência consumida nos terminais elétricos de cada MIT, foi utilizado o modelo por vetores espaciais proposto por Lipo (1998). Para este modelo, são necessários os parâmetros do motor. Como os mesmos não estavam disponíveis para ensaios, tais parâmetros foram estimados pelas metodologias propostas por Assunção(2006) e Almeida (1993), a qual demanda dados de placas, sendo os mesmos disponíveis em catálogos de fabricantes.

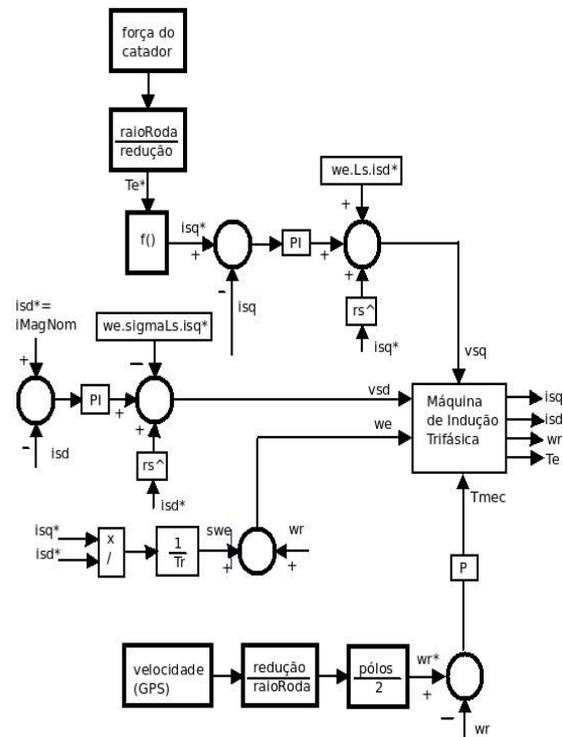


Figura 5. Estrutura de simulação

A partir da inserção destes parâmetros no sistema simulado, obtém-se a potência de entrada. Com a potência transferida à carga e a potência consumida nos terminais elétricos do motor simulado, obtém-se a potência de perdas da máquina, tal como demandado pelo circuito térmico equivalente da figura 4.

Outro parâmetro demandado pelo circuito térmico equivalente é a resistência térmica da máquina. Este parâmetro depende da geometria da máquina e da velocidade de operação para motores auto-ventilados. Estes parâmetros não são disponibilizados em catálogos e, para estimá-los, foi utilizada a curva de proteção contra sobrecarga de inversores de prateleiras apresentada por WEG (2006), tal como ilustrado na figura 6.

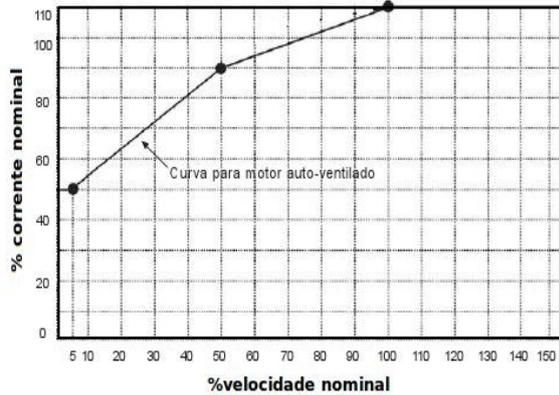


Figura 6. Curva de proteção contra sobrecarga para inversores WEG

Para a estimativa da resistência térmica, foi simulada a operação de cada MIT em regime permanente nos 3 pontos previstos na curva da figura 6. A partir desta simulação, extraiu-se a potência de perdas das máquinas nestes pontos. Considerando-se então a temperatura máxima que o motor pode alcançar pela sua classe de isolamento, a temperatura ambiente de 40°C e a potência de perdas nos pontos de velocidade x corrente de estator máxima, extraiu-se a resistência térmica nestes pontos, tal como mostrado na equação 1.

$$R_{\text{termica}}(\omega) = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{ambiente}}}{P_{\text{perdas}}(\omega)} \quad (1)$$

Para velocidades diferentes daquelas previstas na figura 6, a resistência térmica é estimada por extrapolação e interpolação linear.

O último parâmetro demandado para a simulação do circuito térmico é a capacitância térmica. Este parâmetro é calculado pela massa do motor, disponível em catálogo, e pelo calor específico do ferro fundido, tal como mostrado na equação 2.

$$C_{\text{termica}} = m \cdot c_{\text{especifico}} \quad (2)$$

A potência de perdas em cada instante de operação estimado no sistema da figura 5 foi utilizada no circuito térmico equivalente da figura 4, o qual permitiu estimar a temperatura que seria alcançada por cada motor candidato em cada trajeto medido.

3 Resultados

Foram realizadas 81 simulações, as quais contemplaram a análise de 9 motores - 370W, 550W e 750W, contendo 4, 6 e 8 pólos cada um - em 9 trajetos diferentes desenvolvidos pelos catadores.

Inicialmente, avaliou-se que nenhum dos motores apresentou sobretemperatura. A maior temperatura média obtida, considerando todos os motores avaliados em todas as jornadas de trabalho, foi de 64,8°C.

Esta temperatura foi observada para o motor de 750W, 8 pólos operando sob a jornada de trabalho de 15170 segundos, tal como mostrado na figura 7.

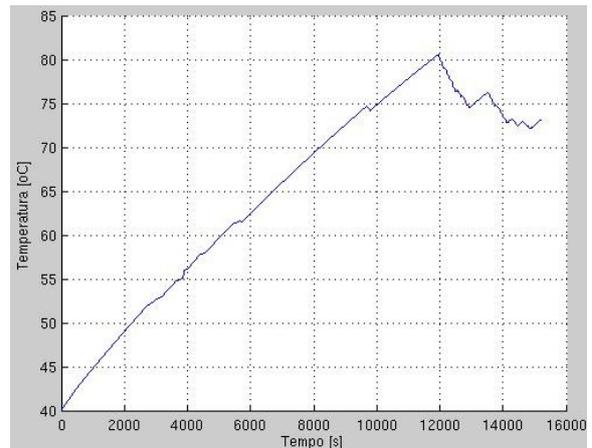


Figura 7. Perfil da temperatura com o tempo para máxima temperatura obtida entre todas as jornadas de trabalho medidas

Apesar das máquinas em questão serem expostas à sobrecargas de conjugado várias vezes durante o trajeto e as respectivas correntes de magnetização nominais, aplicadas ininterruptamente aos motores, serem maiores que 50% da corrente nominal da máquina, existem vários instantes que o operador veículo está parado e demanda conjugado nulo. Tais cenários ocorrem durante paradas em cruzamentos, sinais de trânsito e durante a carga de material no veículo, e contribuem para o resfriamento da máquina.

Considerando que nenhum motor foi descartado por sobretemperatura, avaliou-se se algum deles não conseguia impôr o conjugado desejado na ponta de eixo, considerando tensão limitada ao seu valor nominal e operação tanto em regime dinâmico quanto em regime permanente.

Também concluiu-se que todos atenderam à essas restrições. Tal conclusão é extraída observando-se, nas 81 simulações, as curvas de conjugado eletromagnético e velocidade medidos em campo e previstos na simulação, tal como apresentado nas figuras 8,9,10 e 11.

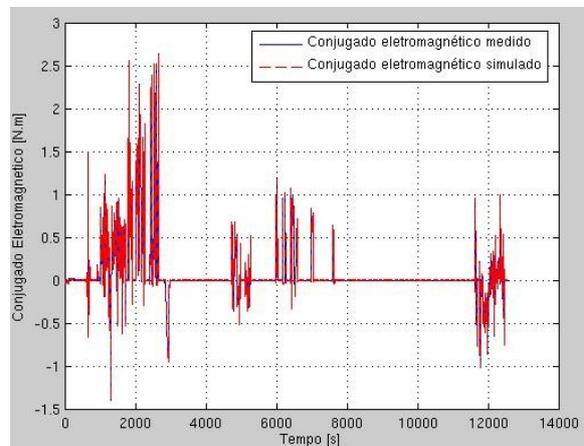


Figura 8. Conjugados eletromagnético de referência e real em uma jornada de trabalho de 12560 segundos

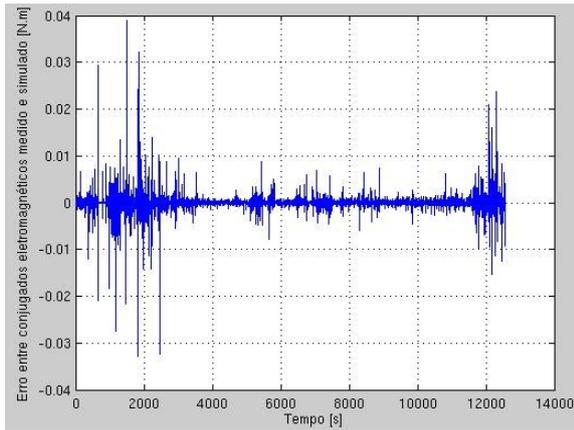


Figura 9. Erro de conjugado eletromagnético

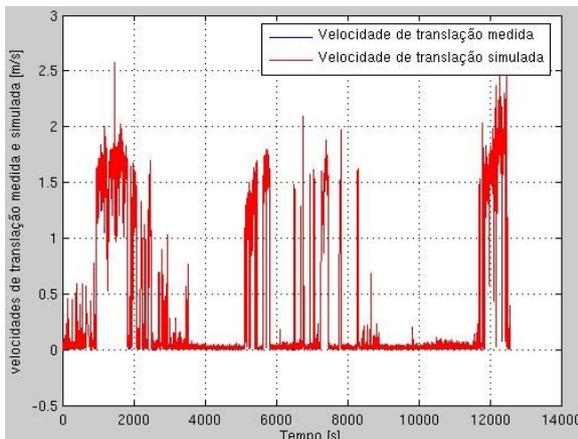


Figura 10. Velocidades de translação medida e simulada

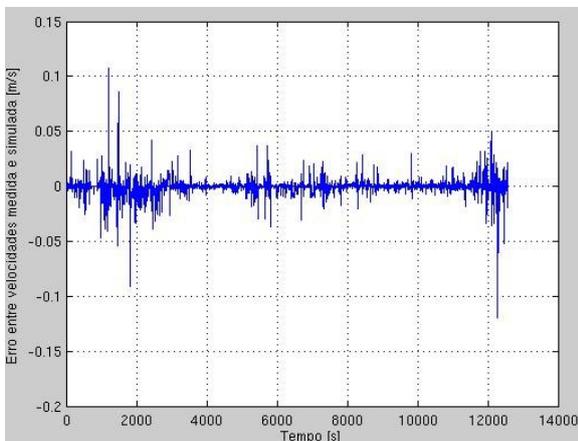


Figura 11. Erro entre velocidade medida e simulada

Para concluir o trabalho, será selecionado o motor que atenda aos trajetos propostos com o menor consumo de energia. Para isso foi calculada a energia consumida nos terminais elétricos de cada motor e em cada trajeto medido, tal como mostrado na equação 3.

$$E_{\text{consumida}} = \int \frac{3}{2} (v_{sd} \cdot i_{sd} + v_{sq} \cdot i_{sq}) \cdot dt \quad (3)$$

A somatória das energias totais que cada motor consumiu nos 9 trajetos analisados é apresentada na figura 11.

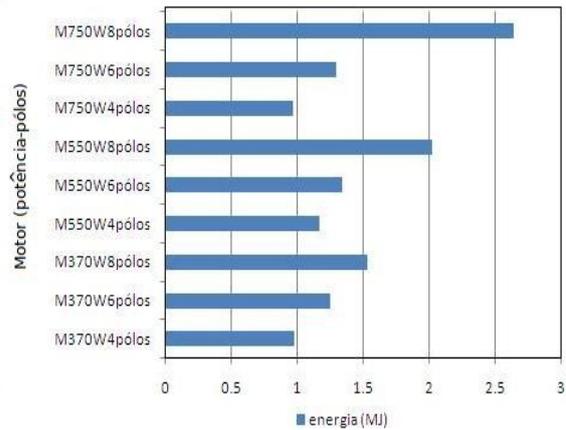


Figura 11. Energia total consumida por cada motor avaliado

4 Contribuições deste artigo

Como mostrado na figura 11, os motores mais adequados à rotina de trabalho dos catadores de São João del-Rei são os de 370W e 750W, ambos com 4pólos. Comparado com o motor proposto por Itaipu(2007), o qual foi especificado em 1cv, o motor 370W atende à carga de trabalho dos catadores, possuindo menor massa e menor custo de aquisição. Baseado nesta conclusão e na baixa renda dos catadores, o motor de 370W é o mais adequado para tracionar os veículos conduzidos pelos catadores de papel de São João del-Rei.

A utilização do GPS apresentada neste artigo sugere uma metodologia inovadora para medição de velocidade em estudos relacionados à veículos elétricos. Tradicionalmente, tais estudos são desenvolvidos com encoders e taco-geradores, os quais demandam a conexão de um número maior de cabos de sinais, os quais são propensos à ruptura. Além disso, esses sensores devem ser instalados no eixo de tração das máquinas, o que demanda acoplamento especificamente projetado para cada aplicação. No caso de GPS, basta embarcar o sensor ao veículo, sem a necessidade de nenhum acoplamento ao eixo de tração.

Como contribuição deste estudo, destaca-se também a abordagem proposta para utilização do controle vetorial e do modelo em vetores espaciais da máquina de indução, o qual possibilitou reproduzir os estados mecânicos presentes no eixo de tração do veículo com um número reduzido de sensores e ensaios para modelagem do veículo. Para reproduzir o comportamento do veículo em simulação, é necessário conhecer o conjugado de carga presente no eixo. Para veículos, este conjugado é composto de 3 parcelas - o conjugado aerodinâmico, o conjugado de rolamento e o conjugado gravitacional. A estimativa do conjugado aerodinâmico demanda o conhecimento do coeficiente aerodinâmico do veículo, o qual é extraído em ensaios específicos. O conjugado de rolamento também demanda ensaios específicos para medição do coeficiente de rolamento. O conjugado gravitacional é estimado pela medição de inclinação da rua

onde o veículo se encontra, o que demanda a utilização de acelerômetros. Pelo método proposto neste artigo, estas 3 parcelas foram automaticamente impostas na simulação alocando-se uma malha de controle relacionada ao conjugado eletromagnético, a qual garantiu que a simulação reproduzisse o conjugado imposto pelo catador, e outra malha de controle, relacionada ao conjugado de carga mecânica, a qual garantiu que o motor simulado apresente a mesma velocidade angular apreciada em campo. Como mostrado nas figuras 7,8,9 e 10, as variáveis de trajetória mecânica da simulação seguiram aquelas medidas, bem como ocorreu entre o conjugado eletromagnético medido e simulado. Assim sendo, conclui-se que o conjugado de carga da simulação representa, com boa aproximação, o conjugado de carga da aplicação, e a sua estimativa dispensou o uso de acelerômetros e ensaios específicos para levantamento de coeficientes aerodinâmico e de rolamento.

5 Conclusão

A metodologia apresentada neste estudo permite que sejam dimensionados motores de indução trifásicos personalizados às necessidades de catadores de papel em qualquer cidade do país, bem como permite que a técnica seja estendida a sistemas de movimentação de cargas, tais como galpões almoxarifados. Destaca-se também a utilização de técnicas de controle vetorial, as quais permitiram reproduzir o comportamento dinâmico dos sinais de trajetória mecânica a partir de um número limitado de sensores e ensaios específicos para estimativa do conjugado de carga.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao suporte do Centro de Estudos da Aeronáutica da UFMG pela valiosa contribuição atribuída ao empréstimo do sistema de aquisição de dados - CEAFDAS - e à Associação de Catadores de São João del-Rei, cujos membros prestaram indispensável participação durante a coleta de dados e prestaram valiosos esclarecimentos relativos ao seu processo de trabalho.

Referências Bibliográficas

- Almeida, A.T.L. (1993) Uma Contribuição à Conservação de Energia e à Manutenção de Motores de Indução Trifásicos de Rotor em Gaiola. Tese de Doutorado, Unicamp.
- Assunção, J. T. Geaquinto, H.D. (2006) Desenvolvimento de um Algoritmo para Simulação do Motor de Indução Trifásico. Anais do 12o Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA - XII ENCITA / 2006.
- Avolio, E. (1992) Uma Contribuição ao Estudo do Comportamento Térmico e do Desempenho Elétrico de Motores de Indução com Rotor em Gaiola. Tese de Doutorado, Unicamp.

- Boyalı, A. Demirci, M. Acarman T., Tur, O. , Uçarol, H. Kiray, B (2006). Modeling and Control of a Four Wheel Drive Parallel Hybrid Electric Vehicle. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications. Munich, Germany.
- Hofman, T. Druten, R. (2005) Concept Design for Hybrid Vehicle Power Systems. 2005 American Control Conference. Portland, OR, USA.
- Iscold, P. Silva, F.M.A.(2005) Sistema de Ensaios em Vôos para Aeronaves - CEA-FDAS. 4o Congresso Temático de Dinâmica, Controle e Aplicações, Unesp, Bauru
- Itaipu Binacional (2007). Itaipu apresenta Veículo Elétrico para Catadores de Recicláveis; Sala de Imprensa, Releases. http://www.itaipu.gov.br/?q=node/435&id_noticia=1736.
- Júnior, N.A. (2005) Motores trifásicos de indução: Dimensionamento. Revista Integração, USJT, ano XI, nº 42, págs. 243-250.
- Lipo, T.A. Novotny, D.W (1998). Vector Control and Dynamics of AC Drives. Clarendon Press, Oxford.
- MNCMR (2008) - Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis. Elementos para organização da coleta seletiva e projeto dos galpões de triagem. <http://www.mncr.org.br/box3/publicacoes-online/Manual%20Coleta%20Seletiva.pdf>
- Valle, R. M. (2007) . Desenvolvimento de Protótipos de Carrinhos Coletores Motorizados para Coleta Formal e Seletiva de Resíduos Sólidos Urbanos.
- WEG (2006). Manual do Inversor de Frequência CFW09. <http://www.weg.net>
- WEG (2009). Catálogo de Motores Elétricos. <http://www.weg.net>

- 8.4 Apêndice D. Artigo aceito para publicação no IEEE ITEC 2014 - *Components, Systems, and Power Electronics - from Technology to Business and Public Policy - "Design and Implementation of a Cost Effective Human-Robot Cooperation System to Aid in Load Translational Displacements"*

Design and Implementation of a Cost Effective Human-Robot Cooperation System to Aid in Load Translational Displacements

Leonardo Silva , Julio Justino, Braz de Jesus Cardoso
Graduate Program in Electrical Engineering
Federal University of Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627,31270-901, Belo Horizonte, Brazil
leo.adolpho@gmail.com , cardosob@ufmg.br

Fabício Pujatti
Dept. of Mechanical Engineering
Federal University of Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627,31270-901, Belo Horizonte, Brazil
pujatti@demec.ufmg.br

Abstract—many professional or daily activities demand load displacement by human arms or by human powered vehicles. Those activities may lead to muscle-skeleton diseases even in load carrying professionals as in people carrying their daily objects [5]. In the robotic field, the research developments to help people at those activities are made through human-robot cooperation systems actuated by servo drives. Due to the cost of those drives, many people are not able to acquire the robots and so they are prohibited from getting the associated health benefits. To help broaden the use of human-robot solutions, this paper presents the design and implementation of a load carrier human-robot cooperation system, which is built through an electrical load cart and driven by frequency inverter and induction motor. The robot's controller is implemented by a force regulation structure which allows the conductor to set the mechanical trajectories through the multiplication of the force applied by his/her arms. Since the arms have a higher positioning bandwidth than the conductor's legs, the controller dynamic response is tuned to do not overcome the human leg dynamics, so preserving the conductor's safety. The paper presents details of mounting, firmware design and measurements to show the robot performance.

Keywords - human-robot cooperation; electrical vehicle; cost; effective

INTRODUCTION

Many professional and daily activities around the world demand load displacement made by human arms or human powered vehicles. Those activities, such as the civil construction, agriculture, docks and displacement in industrial facilities, hire a significant fraction from the economically active work force in many countries. The workers employed at those jobs use to move load bags weighing tens of kilograms at once, and they repeat this task many times a day.

Those type of jobs are abundant, demands a low education degree, but they expose the workers to a significant index of muscle-skeleton diseases. Amdt et al [5] presents a research where 14.32% from 14,474 male in Germany, which worked 10 years in civil construction, were granted with disability pension in the 6 follow up years. Porto [8] presents an index of

17.7% of muscle-skeleton diseases from 207 recyclable materials collectors. Pereira [9] detected the presence of muscle-skeleton problems in 50% of the workers hired in the coffee sack transportation.

Based on the high injury levels observed in professionals, children and elderly; on the high amount of government money spent at disability pensions; and based on the desire to build a load carrier system whose conduction could be done through the natural intention of movement imposed by a person who wants to displace a load, it were developed some human-robot cooperation systems such as iCart [1] and Dr. Helper [2]. Those systems are based on a multi-robot master-slaves platform, whose master is implemented by a person and each robot emulates the mechanical impedance of a caster. The contact between the person and the slave robots is only done by the carried object, and the master's intention to translate and rotate is measured in each robot. In this approach, if the object is moved over an inclined plane, it's difficult to separate the human force intended to produce movement from the gravity force. Besides that, to provide the needed degrees of freedom, each robot has omni-directional properties, which demands a dedicated servo-drive actuator in each of the robot's 4 wheels. This construction restriction leads to a very expensive system, inhibiting so the use of it by many people that could reach the associated health benefits.

Based on those cost restrictions and considering that the majority of the energy spent during load displacements is due to translational movements, the present study shows an human-robot cooperation system based on the Dr. Helper principle [1], but implemented by a single robot, with actuation only in the front direction and implemented by an electrical drive based on frequency inverter and induction motor instead of servo drives. The human-robot interface will be done by direct contact between them, in order to distinguish the gravity from the human forces. The sensing and controller structure will be designed to ensure the robot torque development based into the conductor's natural intention of movement, so that it will not be needed any training by people interfacing with it. Also, since the arms have a faster dynamic behavior than legs; the

commands will be applied to the robot through the arms; and the person will walk in front of the robot, the conductor's safety will be ensured by tuning the robot dynamic response to match the leg's dynamics, so that fast commands imposed by the arms do not lead to accidents.

ROBOT SETUP

A. Mechanical System Description

All the mechanical structure and power elements were designed to aid in the transportation of a 500kg net load and considering the methodology proposed in [3]. The robot structure is built from a chassis in which is embedded a 1.5hp, 220V, three-phase induction motor and an 23:1 transmission system. The rear wheels are driven and they are mounted in parallel, so that there's no problems with side slip. The front wheels are casters, which are used to yaw the robot. This actuation is done from the conductor, which touches a guidance bar. In this bar the user force is measured by a load cell. The complete setup is shown at Figs.1, 2 and 3. At Fig. 3, x_h is the guidance bar position imposed by the human and x_v is the robot position.

The motor rating was determined using the methodology presented in [3], which monitored the torque demanded by load carts used at the activities of brazilian recyclable collectors. Those carts use to move 500kg net loads, over a maximum 8 degrees inclined surfaces, in work journeys taking 4 hours/day and developing typical speeds of 2m/s. The conductors walks with the carts.

The transmission ratio was chosen to match the typical wheel speed range demanded from the users to the speed range where the motor works with higher efficiency, as proposed by Boyali et al [6] for a energy management structure applied to hybrid electrical vehicles.

B. Electronic System Description

The electronic system was designed through four macro systems: frequency inverter, signal conditioning, DSP platform and sensors embedded at the robot. The signal interface between those systems is presented at Fig. 4. In this figure, $w_{encoder}$ is the speed calculated from the encoder signal; $F_{LoadCell}$ and F_h are, respectively, the unconditioned and conditioned human force measured by the load cell; $i_{sq_PWM}^*$ is the DSP PWM modulated torque current reference and i_{sq} is the torque current reference.

The sensors mounted in the robot are a load cell and an encoder. The load cell is dedicated to measure the human force applied to a guidance bar, and this measurement is used to control the robot trajectory. For this study, it is used a nominal 1300N load cell. Since there is difference between the forces applied from the conductor's right and left hands, it has to be chosen a load cell with torsion and bending efforts compensation.

The encoder is applied to feedback the speed signal, which is used to aid on the regulation of zero speed and guarantee a complete stop, even at inclined surfaces, when nobody touches the guidance bar. When there is human contact detected on the guidance bar, the speed measurement is used to synthesize

feed-forward torque commands which are intended to compensate bear rolling friction. In this application, it is used a 1024ppr, differential line driver encoder.



Fig. 1. Side view of the structure and mechanical traction system for electrical load cart, emphasizing the motor, transmission and guidance bar.



Fig. 2. Double stage transmission system.

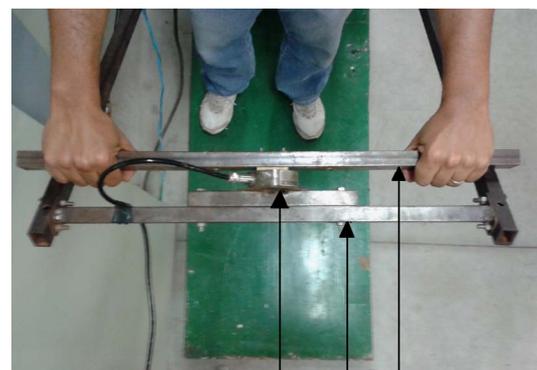


Fig. 3. Load cell mounting scheme for human force measurement. x $z \otimes$ y load cell x_v x_h (guidance bar)

Fig. 3. Load cell mounting scheme for human force measurement.

The frequency inverter is responsible to supply the motor with the appropriate current to develop in the motor axis the

torque commands received from the DSP platform. In order to do that, this inverter has to have embedded torque regulation by vector control capability. For this application, it's used an 8,0A, 220V frequency inverter.

The signal conditioning system is responsible to interface the other structures. To do so, this conditioning system matches the signal levels allowed at the inputs of other building blocks. Also, since the used DSP has no analogic output, the torque reference produced from it is applied through a PWM modulated signal and the conditioning system performs a 2nd order lowpass Butterworth 300Hz cutoff frequency filter based on the Sallen and Key structure to interface between the modulated torque reference to the frequency inverter analogic input.

The DSP receives the human force and speed signals, runs the controller software and produces the torque reference that is sent to the frequency inverter. The details concerned to controller design are presented in the next section.

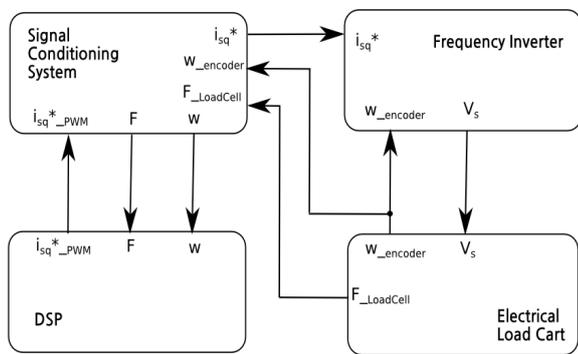


Fig. 4. Block diagram describing signal flow from robot's controller and power systems.

CONTROL SYSTEM DESIGN

C. Design of Control System Structure

The control system is designed under four boundary conditions:

1st) the robot trajectory is imposed from the conductor, independent of the embedded load mass and surface inclination;

2nd) the robot works as human force multiplier, so that the majority of the force applied to move the vehicle in translational displacements comes from the electrical drive;

3rd) to ensure safety, the robot's speed bandwidth has to match the human legs speed bandwidth, i.e., even though the human force is applied through the arms, the vehicle dynamic response has to be compatible with the legs, which has a smaller bandwidth;

4th) the robot has to come to a complete stop when the conductor releases the guidance bar. Also, it has to remain stopped until there's human command again, independently of load allocations or removals, as independently of the lane inclination;

To accomplish all of those conditions, it will be used the control structure presented at Fig. 5. In this figure, k_{df} , k_{pf} and

k_{if} are the derivative, proportional and integral gains for the force regulation compensator; k_{pw} and k_{iw} are the proportional and integral gains for the speed regulation compensator; F_h is the human force applied on the guidance bar; r_{wheel} is the wheel radius; n_{trans} is the transmission ratio; K_{Te} and K_{Te}^{\wedge} are the actual and estimated motor torque constants; b and b^{\wedge} are the actual and estimated bear rolling friction; J_{eq} is the equivalent robot moment of inertia referred to the driven axis; k_{cell} is the load cell elastic constant; $\psi_{surface}$ is the robot pitch angle.

As presented at Fig. 5, the controller switches between two control modes accordingly to the presence of human force at load cell. If there is human force, the controller regulates the robot trajectory in order to have a zero force applied by the person, i.e., the vehicle moves to restore zero deformation at load cell. If there is not human force, the controller switches to speed control mode with zero speed setpoint. In this mode, when the vehicle is over inclined lands or when the conductor is allocating or removing load from it, the electrical drive applies the appropriate torque to perform load rejection, keeping the vehicle stopped.

In order to prevent accidents during the commutation between the force and speed control loops, the regulator that is not operating will have its integrator forced to zero. Also when the conductor releases the guidance bar, the vehicle has to stop and it changes from force to speed control loop. In order to prevent overcurrent and damages on power electronics devices, during the transient state of this commutation, the speed setpoint is generated as a ramp with a 4 seconds time duration to take the speed from nominal value – 1720 rpm – to 0 rpm.

The compensator's tuning design needed to trajectory tracking and load rejection is presented in the next section.

D. Design of Compensators

The robot will provide its dynamic response from the human command applied from the conductor's arms, but the control system bandwidth will be limited to typical bandwidth observed at human legs. In this way, the robot will follow the position setpoint from the human legs displacement, but it will not expose the conductor to risks of accidents.

To measure the speed dynamic response from the legs of typical conductors which could be benefited from the present system, it were monitored 13 hours from the actual work trajectories developed by recyclable collectors, which push through human traction a vehicle with 500kg net load in hilly streets. The measurements and records were done through the CEAFDASu signal acquisition system developed by Iscold et al [7]. The speed measurement was done through a 5Hz GPS with errors of +/- 5cm/s and from the collected speed signals, the time period with an higher acceleration is the one presented at Fig. 6.

Based on the signal presented at Fig. 6, it's observed that the legs have a maximum 1.5Hz bandwidth for the monitored conductors. So the higher absolute value pole related to the system presented at Fig. 5 will be adjusted at 15Hz. The other two poles will be tuned at one decade from each other, and so their adjustments will be set at 1.5 and 0.15Hz. This approach

will ensure dynamic robustness to the system and so, even if the mass vary from the empty robot, which weighs 42.9kg, to the nominal net load, which weighs 500kg, the pole's position will not turn the system unstable.

As presented by Kazerooni [4], the human arm can work as a force control or a position control system. For the system developed in this study, the conductor defines dynamically the desired position for the robot and so his/her cognitive system and arms works as a position control system. Based on this, the human hands position x_h shown at Fig. 3 works as an independent input to the robot. The spectral components of this input that have a frequency lower than that reproducible by the human legs have to be tracked by the vehicle position x_v . So the robot dynamic response can be designed from the transfer function shown in (1) and obtained from the block diagram presented at Fig. (5).

$$\frac{x_v(s)}{x_h(s)} = \frac{-k_1 \cdot k_{df} \cdot s - (-k_1 \cdot k_{pf} - k_{cell} \cdot r) - k_1 \cdot k_{if} / s}{J_{eq} \cdot s^2 - k_1 \cdot k_{df} \cdot s - (-k_1 \cdot k_{pf} - k_{cell} \cdot r) - k_1 \cdot k_{if} / s} \quad (1)$$

where $k_1 = k_{cell} \cdot k_{Te} \cdot n_{trans}$.

During the absence of human contact in the guidance bar, the robot is controlled under the speed regulation loop with zero speed as reference, as shown at Fig. 5. The system transfer function during this operation mode is presented in (2).

$$\frac{\omega_{motor}(s)}{\omega_{motor}^*(s)} = \frac{k_{Te} \cdot k_{pw} + k_{Te} \cdot k_{iw} / s}{J_{motor} \cdot s + (k_{Te} \cdot k_{pw} + b_{motor}) + k_{Te} \cdot k_{iw} / s} \quad (2)$$

Since the bags of load are embedded in step, the speed control loop will be designed exploring the maximum allowable bandwidth. Also, to guarantee control robustness under unpredictable net load variations, this maximum speed bandwidth will be placed one decade lower than the torque current bandwidth. In this implementation, the i_{sq} bandwidth is configured at 100Hz and so the two poles associated with the speed loop will be placed at 10 and 1.0Hz.

Based on the characteristic polynomials shown in (1) and (2), it's presented at table I the compensator's tuning to place the poles at 1.5, 0.15 e 0.015Hz for operation under force regulation mode, as the PI tuning to place the poles at 10.0 and 1.0Hz for operation under speed regulation mode. In this table is also presented the relevant parameters to describe the robot's mechanical impedance.

From the tuning proposed at table 1 it's presented at Fig. 7 the frequency response from the robot position to the conductor position during the application of human force. As it's observed in this figure, the robot response is attenuated to positioning commands imposed at frequencies higher than 1.5Hz.

To evaluate system performance, it's presented at next section some measurements taken from the robot using the designed controller and compensator's tuning.

PERFORMANCE EVALUATION

All the experiments developed to evaluate the system performance were done without restrictions on the way the conductor touches the guidance bar. So, the person interfacing

the robot just touches this bar with one or two hands, with any number of fingers, in any point of the bar, and he/she just pushes or pulls the robot intuitively in the desired direction and with the desired dynamics.

TABLE I. ROBOT PARAMETERS AND PID TUNING

k_{cell}	$7.53 \cdot 10^4$ [N/m]
r_{wheel}	0.125 [m]
k_{Te}	2.7 [N.m/A]
M (robot and net load mass)	543[kg]
n_{trans}	1 : 23.4
J_{motor}	0.0079[kg.m ²]
J_{eq} ($J_{wheel} + J_{motor} \cdot n_{trans}^2 + M \cdot r_{wheel}^2$)	12.03 [kg.m ²]
k_{df}	$-2.8419 \cdot 10^{-4}$ [A.s/N]
k_{pf}	$-2.8543 \cdot 10^{-4}$ [A/N]
k_{if}	$-2.6901 \cdot 10^{-5}$ [A/(N.s)]
k_{pw}	0.184[A/(rad/s)]
k_{iw}	1.1551[A/rad]

In the first experiment, the vehicle moved over a zero degrees surface, with 120kg net load, over a 20m total distance. This displacement was done twice – one time with the electrical drive enabled and the second when it was disabled. To evaluate the force regulation controller performance, it's presented at Fig. 8 the human force considering the helping system enabled. Also, in this figure, it's presented the human force needed to move the vehicle when the electrical drive is enabled and disabled. The comparison between the human forces in those two situations shows the human force multiplication feature desired from the system.

As shown at Fig. 8 the average human force demanded to move the robot without help from the cooperative system is about 3.5 times greater than that observed when the system is enabled. So the system is effective to reduce the probability of muscle-skeleton diseases since it demands a considerable lower force from the conductor. In this control mode the human force setpoint is 0N, and the system moves only if there's human-force. So the movement happens only if there's force error in the force control loop. With force error applied to the regulator's integrator input, there will be an increasingly torque command from its output. This command will make the vehicle to accelerate until the system gets a speed where it loses contact to the conductor, generating a decreasing human force applied from him/her. When this human force gets negative, the regulator commands a negative torque setpoint and the vehicle will reduce its speed. This cycle will be repeated during the system displacement and, in average, the vehicle has to follow the conductor's leg speed. This can be verified by Fig. 9, which shows an average speed without the high bandwidth components from the human force and also this speed has the typical fast walking speed developed by a person as presented by Peterson *et al* [10].

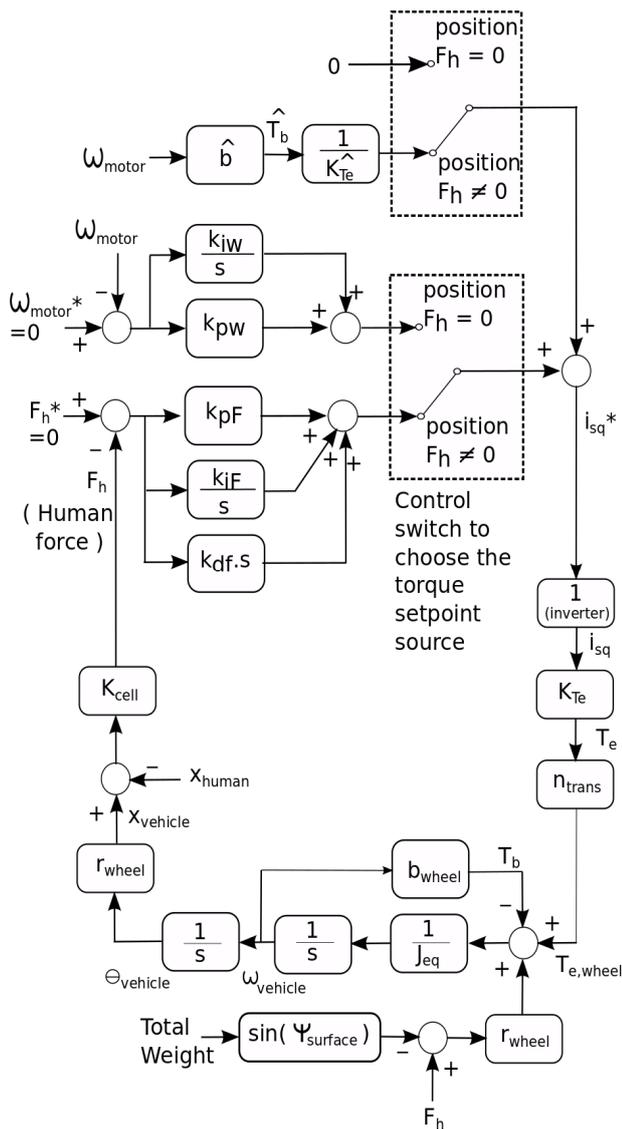


Fig. 5. Block diagram describing the controller and robot model referred to traction axis.

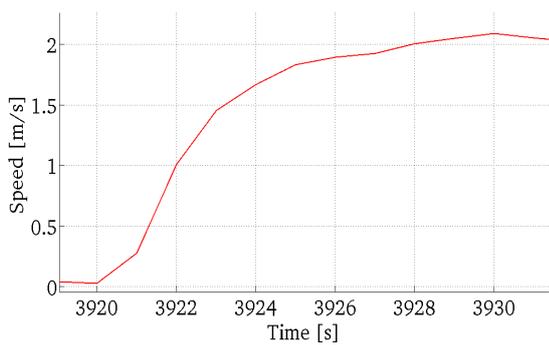


Fig. 6. Maximum bandwidth speed signal imposed by recyclable collectors pulling a 500kg net load through an human powered vehicle.

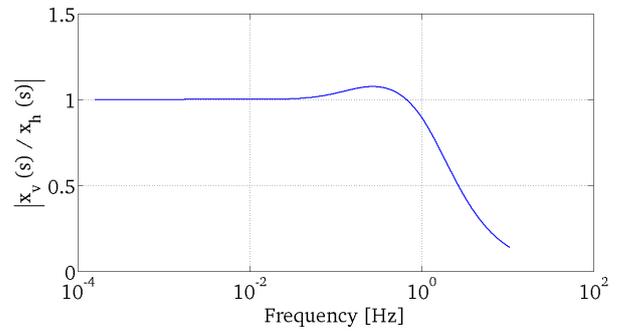


Fig. 7. Robot frequency response to human positioning commands.

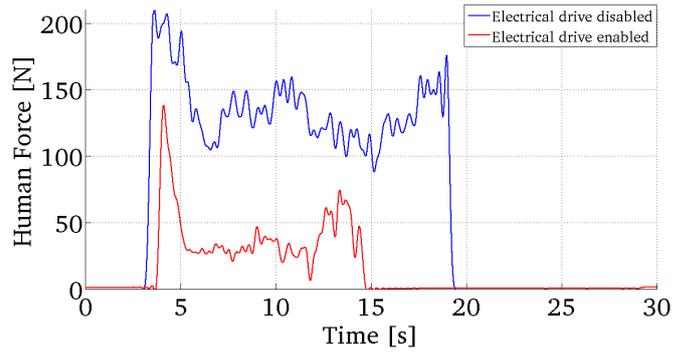


Fig. 8. Human force with 120kg total load over a non-inclined surface.

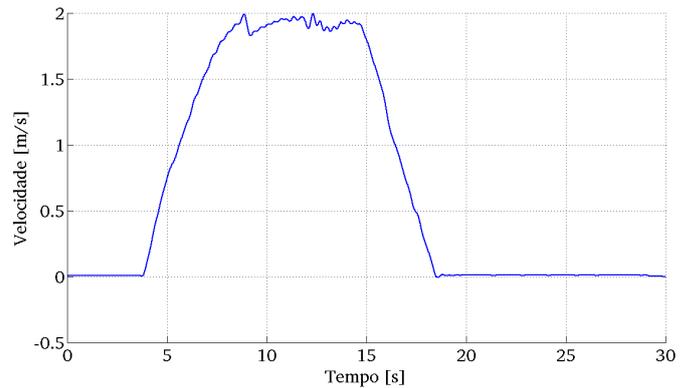


Fig. 9. Human force with 120kg total load over a non-inclined surface.

The next evaluation is done moving the robot through a 7.8 degrees inclined surface, transporting a 120kg net load. Under this condition, it's presented at Fig. 10 the human force considering the cooperation system enabled and disabled. Also, for this experiment and considering the system enabled, it's presented at Fig. 11 the vehicle speed.

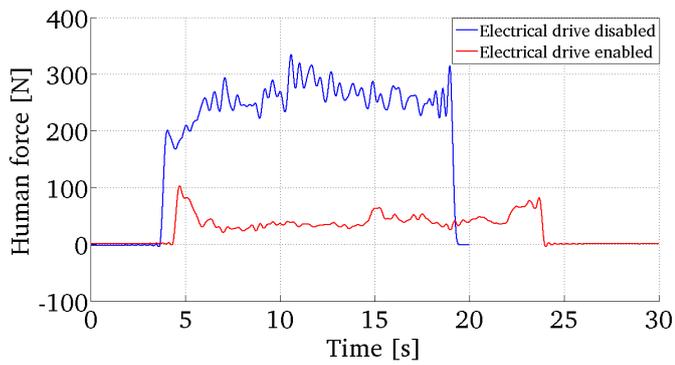


Fig. 10. Human force applied to move the robot with 120kg net load over a 7.8 degrees inclined surface.

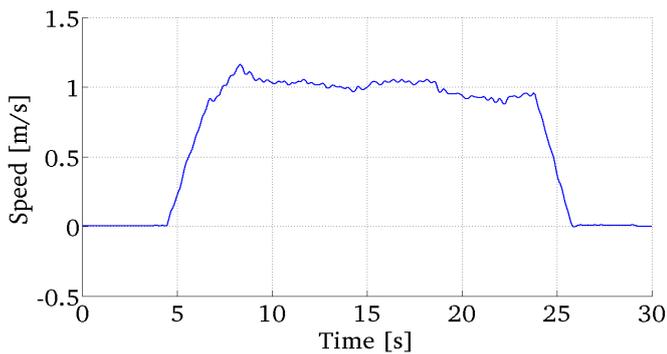


Fig. 11. Vehicle speed developed at a 7.8 degrees inclined surface.



Fig. 12. Vehicle displacement over a 7.8 degrees inclined surface with 120kg



Fig. 13. Step load allocation with absence of human force in the command bar



Fig. 14. Vehicle displacement after load allocation

As shown at Fig. 10, the human force demanded to move upward the robot was approximately 6 times lower when the cooperation system was enabled, reducing so the muscle stress during the time that gravity torque demands the maximum efforts from conductors. As presented at Fig. 10, there are a high frequency force component superimposed to the average force component. This high frequency is developed by human hands at every step on the floor and, as presented at Fig. 11, this high frequency hands command is not responded by the system, since the speed signal does not show those components. This shows the effectiveness of force regulator tuning to ensure the conductor's safety by rejecting hands commands that are faster than those reproducible by human legs.

To evaluate the speed control loop to track zero speed under absence of human commands, the vehicle moved over the same 7.8 degrees inclined surface. The human force and vehicle speed for this experiment are shown at Figs. 15 and 16. The experiment photos are presented at Figs. 12, 13 and 14 and the actions are:

- 1) the vehicle is moving upward with 120kg embedded load and it was stopped by absence of human force command;
- 2) during the stopped stage, the vehicle received a 90kg load allocation in step;
- 3) the vehicle received a human command for uphill movement again;

As presented at Fig 16, the vehicle is stopped before there is step load allocation and it stays stopped after that. The vehicle movement just occurs again when there is human force applied on it. This feature is very convenient since it provides safety when the conductor stops the vehicle, release it, pick up some load and allocate it on the truck, as should be done by a farmer collecting vegetables in an uphill plantation. This shows the the speed regulation control loop effectiveness for trajectory tracking and load rejection.

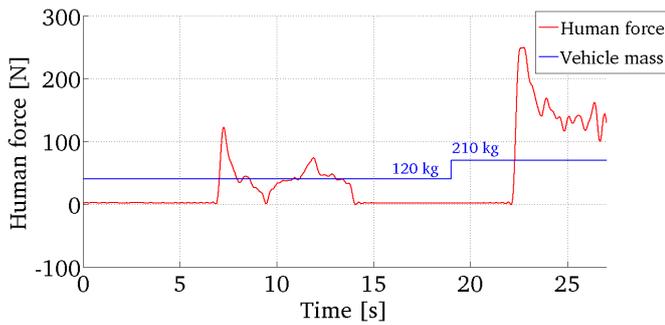


Fig. 15. Human force for uphill movement and 90kg load allocation in step.

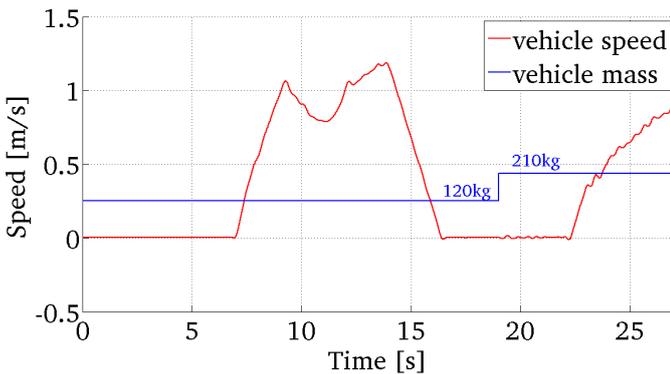


Fig. 16. Vehicle speed for uphill movement and 90kg load allocation in step.

CONCLUSIONS

This paper presents a contribution for design and implementation of a human-robot cooperation system that is applied for load transportation with electrical drive actuation in translational direction. To make the solution accessible by load transportation workers in environments with severe cost restrictions, this robot is based on induction machine frequency inverter electrical drive instead of servo-drives. To provide a friendly interface, the sensor and control systems are designed to detect the natural intention of movement provided by the conductor, so it's not necessary extra training for him/her. Since the interface between human and robot is done through the human hands and the conductor stays between the robot's guidance bar and chassis, the controller is designed to respond to the typical legs bandwidth, so that faster commands applied from the conductor's arms does not lead to accidents. Under those premises, the built robot shows a satisfactory performance, since it multiplies the human force during translational movements in plane or inclined surfaces, it does not respond to high frequency force components applied by hands. Also, in the absence of human intention of movement, the robot stays stopped even when it is over inclined surfaces and there are step variations of its embedded mass.

ACKNOWLEDGMENT

The authors acknowledge the support provided by the Association of Recyclable Collectors of Sao Joao del Rei, Brazil, which offered valuable mechanical trajectory data demanded from a vehicle employed in actual work journeys to move typical 500kg net load and powered by the human body.

REFERENCES

- [1] K. Kashiwazaki, N. Yonezawa, M. Endo, K. Kosuge, Y. Sugahara, Y. Hirata, T. Kanbayashi, K. Suzuki, K. Murakami, K. Nakamura, "A car transportation system using multiple mobile robots: iCART II", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4593-4600, San Francisco, USA, 2011.
- [2] Y. Hirata, K. Kosuge, "Distributed robot helpers handling a single object in cooperation with a human", Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 458-463, San Francisco, USA, 2000.
- [3] L.A. Silva, L.A. Rodrigues, B.J. Cardoso, "Methodology for rating three phase induction motors to drive vehicles used by collectors of recyclable materials". Brazilian Symposium on Intelligent Automation, pp. 1346-1351, 2011.
- [4] H. Kazerooni, "Human-robot interaction via the transfer of power and information signals part I : dynamics and control analysis", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1632-1642, 1989.
- [5] V. Amdt, D. Rothenbacher, U. Daniel, B. Zschenderlein, S. Schuberth, H. Brenner, "Construction work and risk of occupation disability : a ten year follow up of 14474 male workers".
- [6] A. Boyali, M. Demirci, T. Acarman, L. Gunvec, O. Tur, H. Ucarol, B. Kiray, E. Ozatay, "Modeling and control of a four wheel drive parallel hybrid electric drive", IEEE International Conference on Control Applications, pp. 155-162, Munich, Germany, 2006.
- [7] P. Iscold, F.M.A. Silva, "System for Flight Tests for Airplanes - CEA - FDAS", 4th Thematic Congress on Dynamics, Control and Applications, Unesp, Bauru, Brazil, 2005.
- [8] M. Porto, D. Juncá, R. Gonçalves, M. Filhote, "Garbage, work and health : a case study with recyclable collectors in a metropolitan embankment in Rio de Janeiro, Brazil", Public Health Journal, Rio de Janeiro, 20th edition, november, 2004.
- [9] J. Pereira, M. Pinto, R. Souza, "Prevalence of lombalgias in coffee sack carriers". Motriz, Magazine of Physical Education, volume 12, n. 3, UNESP, 2006.
- [10] C. Peterson, S. Kautz, R. Neptune; Braking and propulsive impulses increase with speed during accelerated and decelerated walking; Elsevier, Gait and Posture, pp. 562-567, January, 2011.