Universidade Federal de São João del-Rei
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Associação ampla UFSJ/CEFET-MG

Projeto e Implementação da Estrutura Mecatrônica de Potência para um Exoesqueleto Robótico de Membros Superiores

Caio Eduardo Silva

São João del-Rei
2015

Caio Eduardo Silva

Projeto e Implementação da Estrutura Mecatrônica de Potência para um Exoesqueleto Robótico de Membros Superiores

Dissertação apresentada à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, associação ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Lane Maria Rabelo Baccarini
Co-orientador: Leonardo Adolpho Rodrigues da Silva

Área de Concentração: Modelagem e Controle de Sistemas (MCS)
Linha de Pesquisa: Análise e Modelagem de Sistemas (AMS)

São João del-Rei
2015

Silva, Caio Eduardo.
Projeto e Implementação da Estrutura Mecatrônica de Potência para um Exoesqueleto Robótico de Membros Superiores./ Caio Eduardo Silva. - São João del-Rei: UFSJ, 2015.
xxxi, 135 p. : il.; 30 cm.

Orientadora: Lane Maria Rabelo Baccarini
Co-orientador: Leonardo Adolpho Rodrigues da Silva

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de São João del-Rei, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL).

1. Exoesqueleto. 2. Manipulador robótico. 3. Controle vetorial. 4. Especificação. 5. Modelagem.
I. Universidade Federal de São João del-Rei. Programa de Pós-Graduaçao em Engenharia Elétrica Associação ampla UFSJ/CEFET-MG. Departamento de Engenharia Elétrica. II. Título

CDU:

Dedico este trabalho aos meus familiares, à minha namorada e a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação de mestrado.

Agradecimentos

A Deus, pois sem ele tudo seria mais difícil, senão impossível.

Ao meu pai, Gilmar, que batalhou muito para estudar e conquistar o que tem hoje, que mesmo nos momentos mais difíceis prezou pela minha educação e me ensinou que somente por meio da educação seria possível crescer.

À minha mãe, Tânia, que sempre esteve presente nos meus momentos de tristeza e de alegria, e pela paciência em me ouvir nos meus momentos de ansiedade.

Ao meu irmão Leonardo, pelo apoio.

À Gabriela, minha namorada, pelo amor, carinho e compreensão. Com você sou ainda mais feliz!

À minha orientadora e meu co-orientador, professora Dra. Lane Maria Rabelo Baccarini e professor Dr. Leonardo Adolpho Rodrigues da Silva, pela confiança, paciência, por todos ensinamentos ao longo do desenvolvimento deste trabalho e por todos os momentos de descontração em nossas reuniões no LaMeT.

Ao meu companheiro de pesquisa e amigo, Francisco, pela paciência, pelos conhecimentos partilhados, e por ter tornado este trabalho ainda

mais prazeroso.

A todos os professores e técnicos do DEPEL; em especial à professora Dra. Valceres Vieira Rocha e Silva, por ter me iniciado no mundo da pesquisa científica e aos técnicos de laboratório Juscelino Henrique Bertolato Silva e João Daniel Nolasco Silva por estarem dispostos a ajudar e facilitarem o andamento da pesquisa.

Aos funcionários da serralheria e marcenaria da UFSJ, Divino, Sérgio e David, e ao Diego, da Tornearia São Miguel, que estiveram dispostos a ajudar na construção dos manipuladores.

Aos alunos de Mecatrônica da UFSJ, Carlos Orsetti e Victor Lopes, pela conversa e pelas ideias apresentadas.

Aos amigos que fiz durante a graduação e mestrado! Sem vocês não teria sido a mesma coisa.

À CAPES, UFSJ e CNPQ, pelo apoio financeiro ao longo dos anos.

Enfim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho. Muito obrigado a todos.

Epígrafe

"I do not know what I may appear to the world, but to myself I seem to have been only like a boy playing on the sea-shore, and diverting myself in now and then finding a smoother pebble or a prettier shell than ordinary, whilst the great ocean of truth lay all undiscovered before me."

Isaac Newton

---

[a]Não sei o que possa parecer aos olhos do mundo, mas aos meus pareço apenas ter sido como um menino brincando à beira-mar, divertindo-me com o fato de encontrar de vez em quando um seixo mais liso ou uma concha mais bonita que o normal, enquanto o grande oceano da verdade permanece completamente por descobrir à minha frente.

Resumo

As lesões músculo esqueléticas (LME) são um importante problema de saúde pública, sendo que a nível mundial uma grande quantidade dos casos de dores lombares é atribuída a causas de origem ocupacional, e neste contexto surge a motivação desta dissertação de mestrado. Desta forma, neste trabalho desenvolveu-se o projeto e implementação da estrutura mecatrônica de potência para um exoesqueleto robótico de membros superiores, que possibilitará ao usuário que o "vestir", realizar a movimentação de cargas impondo apenas intenção de movimento. O usuário terá a sensação de realizar uma força bem inferior à que seria sentida sem o manipulador robótico proposto, o que pode, no futuro, minimizar as LME de origem ocupacional. São apresentados trabalhos desenvolvidos na área e são descritas a metodologia para estimação de torque e especificação de motores de indução trifásicos que são utilizados no acionamento deste exoesqueleto robótico. A formulação de Euler-Lagrange é utilizada para descrever o comportamento dinâmico do sistema mecânico e estimar os torques demandados em cada junta, com base na energia do sistema. É utilizado ainda um sistema de medição provido de um acelerômetro triaxial, para a obtenção de trajetórias que caracterizem movimentos que podem ser desenvolvidos pelos manipuladores. Tais trajetórias são utilizadas como entrada para o modelo de Euler-Lagrange obtido, tendo como saída os conjugados das juntas do manipulador proposto. A partir dos conjugados e trajetórias, obtém-se os motores e relações de transmissão mais adequados para a aplicação, de modo que não haja sobreaquecimento e queima de motores nas trajetórias traçadas para o exoesqueleto robótico.

Palavras-chave: exoesqueleto, manipulador robótico, controle vetorial, especificação, modelagem.

Abstract

Musculoskeletal disorders are an important issue at public healthy care around the world and in a worldwide level a huge amount of cases of back pain are work-related, and in this context comes to light the motivation to develop this master thesis. In this sense, this study develops the design and implementation of the power mechatronics structure for an upper-limb exoskeleton, that will allow the user that "wears" it to perform load displacement just imposing movement intention. The user will have the feeling of performing a smaller force than would be felt without the proposed robotic manipulator, and this may, in the future, minimize work related musculoskeletal disorders. Studies developed in this field are presented and is described a methodology to torque estimation and specification of three phase induction motors that are applied at this upper-limb exoskeleton actuation. The Euler-Lagrange formulation is used to describe the dynamical behaviour behind of the mechanical system and to estimate the torques required in each joint, based on system energy. A measuring system based on a triaxial acceletometer is used to obtain trajectories that characterize movements that can be developed by the manipulators. Such trajectories are used as input data for the Euler-Lagrange obtained model, and, as output, are obtained the torques for each joint of the proposed manipulator. From the torques and trajectories it is obtained the more appropriate motors and transmission ratios to use in the application, in order to avoid the overload in the motors in the trajectories plotted for each exoskeleton arms.

Keywords: exoskeleton, robotic manipulator, vector control, specification, dynamic modelling.

Lista de Tabelas

4.1 Posições utilizadas para calibração dos módulos WDSS. . . 34
4.2 Dados não processados de aceleração para o módulo WDSS Kaptiza. 35
4.3 Dados não processados de aceleração para o módulo WDSS Rabtiza. 35
4.4 Dados pós-calibração para o módulo WDSS Kaptiza para as 6 posições medidas. 36
4.5 Dados pós-calibração para o módulo WDSS Rabtiza para as 6 posições medidas. 36
4.6 Perfil dos indivíduos que participaram das medições de trajetória. 37
4.7 Frequências referentes à dinâmica do movimento das juntas do braço humano. 49

5.1 Relações de transmissão "i" obtidas para a junta 1. 55
5.2 Relações de transmissão "i" obtidas para a junta 2. 55
5.3 Relações de transmissão "i" obtidas para a junta 3. 56
5.4 Relações de transmissão "i" obtidas para a junta 4. 56
5.5 Parâmetros do circuito equivalente da máquina e grandezas mais sensíveis a estes. 57
5.6 Faixas típicas dos parâmetros do circuito equivalente para máquinas de indução de grande porte (potência nominal maior que 10 cv). 59
5.7 Relação entre as reatâncias X_1 e X_2. 60
5.8 Características nominais das máquinas de indução avaliadas. 60
5.9 Parâmetros obtidos para as máquinas de indução avaliadas. 63
5.10 Correntes de magnetização obtidas para as máquinas de indução avaliadas. 64
5.11 Conjugados demandados nos eixos das máquinas, para cada uma das juntas, para a trajetória que apresentou o maior valor de conjugado máximo. 64

5.12 Massas dos enrolamentos e núcleos de estator e rotor das máquinas candidatas ao acionamento dos manipuladores. . 84
5.13 Temperaturas admissíveis para os enrolamentos de estator em função da classe de isolamento. 86
5.14 Elevações de temperatura admissíveis para os enrolamentos do rotor em gaiola, em função da classe de isolamento, medidos pelo método da resistência. 87
5.15 Elevações de temperatura admissíveis para o núcleo magnético do rotor e outras partes em contato com o enrolamento, em função da classe de isolamento, medidos pelo método do termômetro. 88
5.16 Resistências térmicas das máquinas candidatas ao acionamento dos manipuladores. 88
5.17 Tempo para ultrapassar o valor de elevação de temperatura admissível pelas máquinas candidatas ao acionamento da Junta 1. 91
5.18 Tempo para ultrapassar o valor de elevação de temperatura admissível pelas máquinas candidatas ao acionamento da Junta 2. 91
5.19 Tempo para ultrapassar o valor de elevação de temperatura admissível pelas máquinas candidatas ao acionamento da Junta 3. 91
5.20 Tempo para ultrapassar o valor de elevação de temperatura admissível pelas máquinas candidatas ao acionamento da Junta 4. 92
5.21 Menor tempo para ultrapassar o valor de elevação de temperatura admissível pelas máquinas candidatas ao acionamento dos manipuladores robóticos. 92
5.22 Energia consumida em uma repetição das trajetórias utilizadas pelas máquinas candidatas ao acionamento da Junta 1. 94
5.23 Energia consumida em uma repetição das trajetórias utilizadas pelas máquinas candidatas ao acionamento da Junta 2. 94
5.24 Energia consumida em uma repetição das trajetórias utilizadas pelas máquinas candidatas ao acionamento da Junta 3. 94

5.25 Energia consumida em uma repetição das trajetórias utilizadas pelas máquinas candidatas ao acionamento da Junta 4. 95
5.26 Energia média consumida em uma repetição das trajetórias utilizadas pelas máquinas candidatas ao acionamento dos manipuladores robóticos. 95
5.27 Síntese dos resultados para a Junta 1 95
5.28 Síntese dos resultados para a Junta 2 96
5.29 Síntese dos resultados para a Junta 3 96
5.30 Síntese dos resultados para a Junta 4 96
5.31 Elementos de potência especificados para a Junta 1 dos manipuladores robóticos. 97
5.32 Elementos de potência especificados para a Junta 2 dos manipuladores robóticos. 97
5.33 Elementos de potência especificados para a Junta 3 dos manipuladores robóticos. 97
5.34 Elementos de potência especificados para a Junta 4 dos manipuladores robóticos. 98
5.35 Especificação técnica dos conversores de frequência utilizados nos manipuladores robóticos. 101
5.36 Fusíveis especificados para proteção dos conversores de frequência utilizados contra curto-circuito. 102

Lista de Figuras

2.1 Exoesqueleto amplificador de força humana conhecido como Hardiman. 7
2.2 Exoesqueletos robóticos de membros utilizados para amplificação de força humana. 8
2.3 Exoesqueleto de membro superior utilizando cabos. 11
2.4 Veccar modelado em *SolidWorks* e Veccar construído. . . . 14

3.1 Estrutura e manipulador robótico inicialmente propostos. . 20
3.2 Configurações do centro de massa e dos ângulos de atitude dos manipuladores - Vista Lateral. 21
3.3 Configurações do centro de massa e dos ângulos de atitude dos manipuladores - Vista Posterior. 22

4.1 Sistema para medição de acelerações lineares em três eixos. 32
4.2 Sistema de Coordenadas NED. 33
4.3 Indivíduos 1 e 2 realizando suas trajetórias. 37
4.4 Acelerações obtidas por meio da unidade WDSS. 38
4.5 Acelerações obtidas por meio da unidade WDSS, após filtragem. 39
4.6 Inclinações das juntas do manipulador robótico. 40
4.7 Posições, velocidades e acelerações das juntas do manipulador robótico - Trajetória 1. 41
4.8 Posições, velocidades e acelerações das juntas do manipulador robótico - Trajetória 2. 42
4.9 Posições, velocidades e acelerações das juntas do manipulador robótico - Trajetória 3. 43
4.10 Posições, velocidades e acelerações das juntas do manipulador robótico - Trajetória 4. 44
4.11 Posições, velocidades e acelerações das juntas do manipulador robótico - Trajetória 5. 45
4.12 Posições, velocidades e acelerações das juntas do manipulador robótico - Trajetória 6. 46

4.13 Posições, velocidades e acelerações das juntas do manipulador robótico - Trajetória 7. 47
4.14 Posições, velocidades e acelerações das juntas do manipulador robótico - Trajetória 8. 48
4.15 Conjugado para as juntas dos manipuladores robóticos - Junta 1. 49
4.16 Conjugado para as juntas dos manipuladores robóticos - Junta 2. 50
4.17 Conjugado para as juntas dos manipuladores robóticos - Junta 3. 50
4.18 Conjugado para as juntas dos manipuladores robóticos - Junta 4. 51

5.1 Circuito Equivalente por fase de um MIT. 57
5.2 Velocidade x conjugado eletromagnético - Tentativas de estimação das resistências de rotor do Motor WEG W22 Plus 1,5CV, 220/380V, 8 polos. 60
5.3 Velocidade x potência de saída - Tentativas de estimação das resistências de rotor do Motor WEG W22 Plus 1,5CV, 220/380V, 8 polos. 61
5.4 Velocidade x conjugado eletromagnético - Tentativas de estimação das indutâncias de dispersão do Motor WEG W22 Plus 1,5CV, 220/380V, 8 polos. 61
5.5 Velocidade x fator de potência - Tentativas de estimação da indutância de magnetização do Motor WEG W22 Plus 1,5CV, 220/380V, 8 polos. 62
5.6 Velocidade x Eficiência - Tentativas de estimação da resistência de perdas no ferro do Motor WEG W22 Plus 1,5CV, 220/380V, 8 polos. 62
5.7 Velocidade x Corrente de Estator - Tentativas de estimação da resistência de estator do Motor WEG W22 Plus 1,5CV, 220/380V, 8 polos. 63
5.8 Tempo x Referência de conjugado eletromagnético para a trajetória de máxima demanda conjugado (Trajetória 4 - Junta 1) obtida por meio das trajetórias medidas e do modelo dinâmico dos manipuladores robóticos para as máquinas candidatas e suas respectivas razões de transmissão. . 65

5.9 Tempo x Referência de conjugado eletromagnético para a trajetória de máxima demanda conjugado (Trajetória 8 - Junta 2) obtida por meio das trajetórias medidas e do modelo dinâmico dos manipuladores robóticos para as máquinas candidatas e suas respectivas razões de transmissão. . 66
5.10 Tempo x Referência de conjugado eletromagnético para a trajetória de máxima demanda conjugado (Trajetória 8 - Junta 3) obtida por meio das trajetórias medidas e do modelo dinâmico dos manipuladores robóticos para as máquinas candidatas e suas respectivas razões de transmissão. . 66
5.11 Tempo x Referência de conjugado eletromagnético para a trajetória de máxima demanda conjugado (Trajetória 2 - Junta 4) obtida por meio das trajetórias medidas e do modelo dinâmico dos manipuladores robóticos para as máquinas candidatas e suas respectivas razões de transmissão. . 67
5.12 Circuito equivalente da máquina de indução modificado. . 68
5.13 Circuito equivalente em regime permanente da máquina de indução para correntes dq. 69
5.14 Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator do Motor WEG W22 Plus 0,16CV, 220/380V, 8 polos. 70
5.15 Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator do Motor WEG W22 Plus 0,25CV, 220/380V, 8 polos. 70
5.16 Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator do Motor WEG W22 Plus 0,33CV, 220/380V, 8 polos. 71
5.17 Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator do Motor WEG W22 Plus 0,50CV, 220/380V, 8 polos. 71
5.18 Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator do Motor WEG W22 Plus 0,75CV, 220/380V, 8 polos. 72
5.19 Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator do Motor WEG W22 Plus 1,0CV, 220/380V, 8 polos. 72
5.20 Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator do Motor WEG W22 Plus 1,5CV, 220/380V, 8 polos. 73

5.21 Malha de regulação de velocidade. 73
5.22 Conversor de Energia. 75
5.23 Malha de corrente I_{sq}. 75
5.24 Malha de corrente I_{sd}. 76
5.25 Diagrama de blocos para simulação das máquinas elétricas candidatas ao acionamento dos manipuladores robóticos, considerando as demandas de trajetória e torque reais medidas utilizando 2 indivíduos. 79
5.26 Circuito térmico do estator da máquina de indução. 81
5.27 Circuito térmico do rotor da máquina de indução. 81
5.28 Fator de correção das resistências térmicas da máquina de indução em função da velocidade de operação e da velocidade nominal da mesma. 90
5.29 Gráficos de velocidade angular mecânica de referência, velocidade angular mecânica desenvolvida e erro de rastreamento de trajetória para a máquina de indução especificada para a Junta 1. 98
5.30 Gráficos de velocidade angular mecânica de referência, velocidade angular mecânica desenvolvida e erro de rastreamento de trajetória para a máquina de indução especificada para a Junta 2. 99
5.31 Gráficos de velocidade angular mecânica de referência, velocidade angular mecânica desenvolvida e erro de rastreamento de trajetória para a máquina de indução especificada para a Junta 3. 99
5.32 Gráficos de velocidade angular mecânica de referência, velocidade angular mecânica desenvolvida e erro de rastreamento de trajetória para a máquina de indução especificada para a Junta 4. 100
5.33 Conexões de potência e aterramento de um conversor de frequência CFW11 da WEG. 102

6.1 Estrutura para fixação do manipulador e o manipulador desenvolvido. 106
6.2 Chave de fim de curso instalada na junta 2 do manipulador robótico. 107
6.3 Exterior e interior do painel construído. 108
6.4 Polias do primeiro estágio de transmissão mecânica. 108

6.5 Polia do segundo estágio de transmissão mecânica e acoplada ao eixo de saída do primeiro estágio de transmissão mecânica. 109
6.6 Vistas frontal e lateral da polia do segundo estágio de transmissão mecânica e acoplada ao manipulador. 110
6.7 Interface Homem Máquina para o manipulador desenvolvido. 111
6.8 Vistas frontal e lateral do usuário "vestindo" o manipulador desenvolvido. 112
6.9 Caminhos para o ruído conduzido de modo comum. 114
6.10 Aterramento do invólucro de papel alumínio dos cabos de alimentação ao dissipador do inversor. 115

Lista de Símbolos

R_s	Resistência de estator	$[\Omega]$
R_r	Resistência de rotor	$[\Omega]$
R_{fe}	Resistência de perdas no ferro	$[\Omega]$
L_{ls}	Indutância de dispersão de estator	$[H]$
L_{lr}	Indutância de dispersão de rotor	$[H]$
V_s	Tensão de estator de fase	$[V]$
V_m	Tensão no ramo de magnetização	$[V]$
I_s	Corrente de estator de fase	$[A]$
I_r	Corrente de rotor de fase	$[A]$
I_{fe}	Corrente que circula na resistência de perdas no ferro	$[A]$
I_m	Corrente de magnetização	$[A]$
L_s, L_r	Indutâncias de estator e rotor	$[H]$
M	Indutância de magnetização	$[H]$
s	Escorregamento	$[pu]$
σ	Constante dada por $(1 - M^2/L_s\,L_r)$	$[pu]$
C_{ee}	Capacidade térmica do enrolamento de estator	$[J/°C]$
C_{ne}	Capacidade térmica do núcleo de estator	$[J/°C]$
C_{er}	Capacidade térmica do enrolamento de rotor	$[J/°C]$
C_{nr}	Capacidade térmica do núcleo de rotor	$[J/°C]$
R_{ene}	Resistência térmica entre o enrolamento e núcleo de estator da máquina de indução	$[°C/W]$
R_{ne}	Resistência térmica entre o núcleo de estator da máquina de indução e o meio ambiente	$[°C/W]$
R_{enr}	Resistência térmica entre o enrolamento e núcleo de rotor da máquina de indução	$[°C/W]$
R_{nr}	Resistência térmica entre o núcleo de rotor da máquina de indução e o meio ambiente	$[°C/W]$
P_{j_1}	Potência de perdas joule no enrolamento do estator da máquina de indução	$[W]$
P_{j_2}	Potência de perdas joule no enrolamento do rotor da máquina de indução	$[W]$
P_{j_1n}	Potência de perdas joule no enrolamento do estator da máquina de indução em condições nominais	$[W]$
P_{j_2n}	Potência de perdas joule no enrolamento do rotor da máquina de indução em condições nominais	$[W]$

P_{fe_1}	Potência de perdas no ferro do estator da máquina de indução	$[W]$
P_{fe_2}	Potência de perdas no ferro do rotor da máquina de indução	$[W]$
P_{fe_1n}	Potência de perdas no ferro do estator da máquina de indução em condições nominais	$[W]$
P_{fe_2n}	Potência de perdas no ferro do rotor da máquina de indução em condições nominais	$[W]$
E	Energia consumida pelas máquinas candidatas em um ciclo de utilização	$[Wh]$
c_{ee}	Calor específico do enrolamento de estator da máquina de indução	$[W/°C \cdot s \cdot Kg]$
c_{ne}	Calor específico do núcleo de rotor da máquina de indução	$[W/°C \cdot s \cdot Kg]$
c_{er}	Calor específico do enrolamento de estator da máquina de indução	$[W/°C \cdot s \cdot Kg]$
c_{nr}	Calor específico do núcleo de rotor da máquina de indução	$[W/°C \cdot s \cdot Kg]$
m_{ee}	Massa do enrolamento de estator da máquina de indução	$[Kg]$
m_{ne}	Massa do núcleo de rotor da máquina de indução	$[Kg]$
m_{er}	Massa do enrolamento de estator da máquina de indução	$[Kg]$
m_{nr}	Massa do núcleo de rotor da máquina de indução	$[Kg]$
θ_{ee}	Elevação de temperatura média no enrolamento de estator da máquina de indução	$[°C]$
θ_{ne}	Elevação de temperatura média no núcleo de estator da máquina de indução	$[°C]$
θ_{er}	Elevação de temperatura média no enrolamento de rotor da máquina de indução	$[°C]$
θ_{nr}	Elevação de temperatura média no núcleo de rotor da máquina de indução	$[°C]$
θ_{isol}	Elevação de temperatura média admissivel para o enrolamento de estator da máquina de indução	$[°C]$
$\Delta\theta_e$	Diferença de temperatura entre o ponto mais quente e a temperatura média do enrolamento de estator da máquina de indução	$[°C]$
θ_{adm1}	Elevação de temperatura admissivel para o enrolamento de rotor da máquina de indução	$[°C]$
θ_{adm2}	Elevação de temperatura admissivel para o núcleo de rotor da máquina de indução	$[°C]$
$\Delta\theta_r$	Diferença entre as elevações de temperatura admissíveis de enrolamento e núcleo de rotor da máquina de indução	$[°C]$
k_v	Fator de correção das resistências térmicas da máquina de indução em função de ω_m e ω_n	$[pu]$
ω_m	Velocidade de operação da máquina de indução	$[rad/s]$
ω_n	Velocidade nominal de operação da máquina de indução	$[rad/s]$
i_s	Corrente de estator da máquina de indução	$[A]$
i_r	Corrente de rotor da máquina de indução	$[A]$
i_{fe}	Corrente de perdas no ferro da máquina de indução	$[A]$
$i_{termica}$	Corrente térmica equivalente	$[A]$
M_{load}	Massa da carga a ser erguida pelo manipulador robótico	$[Kg]$

B_{ω_ω}	Banda passante de velocidade	$[rad/s]$
B_{ω_θ}	Banda passante de posição	$[rad]$
$B_{\omega_{\int\theta}}$	Banda passante de integral de posição	$[\int rad]$
$K_{P\omega}$	Ganho proporcional da malha de velocidade	
$K_{I\omega}$	Ganho integral da malha de velocidade	
K_{Pisq}	Ganho proporcional da malha de corrente em eixo q	
K_{Pisd}	Ganho proporcional da malha de corrente em eixo d	
K_{Iisd}	Ganho integral da malha de corrente em eixo d	
q_1, q_2, q_3, q_4	Posições angulares das juntas 1, 2, 3 e 4 dos manipuladores robóticos	$[rad]$
$\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dot{q}_4$	Velocidades angulares das juntas 1, 2, 3 e 4 dos manipuladores robóticos	$[rad/s]$
$\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \ddot{q}_3, \ddot{q}_4$	Acelerações angulares das juntas 1, 2, 3 e 4 dos manipuladores robóticos	$[rad/s^2]$
L	Lagrangiano do sistema	$[J]$
K	Energia cinética total do sistema	$[J]$
V	Energia potencial total do sistema	$[J]$
τ	Vetor de forças generalizadas dos manipuladores	$[N.m]$
g	Aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
x_1, x_2, x_3, x_4	Posições x do centro de massa dos manipuladores robóticos com relação ao referencial inercial de estudo	$[m]$
y_1, y_2, y_3, y_4	Posições y do centro de massa dos manipuladores robóticos com relação ao referencial inercial de estudo	$[m]$
z_1, z_2, z_3, z_4	Posições z do centro de massa dos manipuladores robóticos com relação ao referencial inercial de estudo	$[m]$
ϕ	Atitude de rolamento	$[rad]$
θ	Atitude de arfagem	$[rad]$
ψ	Atitude de guinada	$[rad]$
A_x, A_y, A_z	Projeções da aceleração da gravidade medidas pelo acelerômetro nos eixos x, y e z	$[m/s^2]$
Y	Matriz com o vetor gravidade da Terra conhecido normalizado	$[pu]$
W	Matriz com os dados crus de acelerações coletados com os módulos *WDSS*	$[pu]$
X	Matriz com os parâmetros de calibração dos módulos *WDSS*	$[pu]$
i	Relação de transmissão	
$T_{CargaMax}$	Torque de carga máximo demandado por cada uma das juntas	$[N.m]$
$T_{NomMaqCand}$	Torque nominal de cada uma das máquinas candidatas	$[N.m]$
I_{sd}	Corrente de estator em eixo d	$[A]$
I_{sd^*}	Corrente de estator em eixo d de referência	$[A]$
$I_{sd,nom}$	Corrente de estator em eixo d nominnal	$[A]$
I_{sq}	Corrente de estator em eixo q	$[A]$
I_{sq^*}	Corrente de estator em eixo q de referência	$[A]$
V_{sd}	Tensão de estator em eixo d	$[V]$
V_{sq}	Tensão de estator em eixo q	$[V]$
$\widehat{b}$	Coeficiente de atrito viscoso da máquina de indução	$[\frac{N.m}{rad/s}]$

ω_{motor}	Velocidade angular mecânica da máquina	$[rad/s]$
ω^*_{motor}	Velocidade angular mecânica de referência da máquina	$[rad/s]$
ω_r	Velocidade angular do campo do rotor	$[rad/s]$
α^*_{motor}	Aceleração angular de referência da máquina	$[rad/s^2]$
P	Número de pares de polos da máquina de indução	$[rad/s^2]$
ω_e	Frequência de alimentação da máquina elétrica	$[rad/s]$
T_{eFB}	Parcela de conjugado eletromagnético de referência de *Feedback*	$[N.m]$
T_{eFF}	Parcela de conjugado eletromagnético de referência de *Feedforward*	$[N.m]$
T^*_e	Conjugado eletromagnético de referência total	$[N.m]$
T_e	Conjugado eletromagnético desenvolvido	$[N.m]$
T_L	Conjugado de carga da máquina de indução	$[N.m]$
T_{juntas}	Conjugado de carga no eixo das juntas do manipulador	$[N.m]$
η	Rendimento da transmissão mecânica	$[pu]$
P_n	Potência nominal das máquinas candidatas	$[CV]$
n	Velocidade de rotação nominal das máquinas candidatas	$[rpm]$
I_n	Corrente nominal de estator das máquinas candidatas	$[A]$
I_p/I_n	Relação entre a corrente nominal e a corrente de partida de estator das máquinas candidatas	$[pu]$
C_n	Conjugado nominal das máquinas candidatas	$[N.m]$
C_p/C_n	Relação entre o conjugado de partida e o conjugado nominal das máquinas candidatas	$[pu]$
C_k/C_n	Relação entre o conjugado máximo e o conjugado nominal das máquinas candidatas	$[pu]$
FP	Fator de potência nominal das máquinas candidatas	$[pu]$
η	Rendimento nominal das máquinas candidatas	$[pu]$
J	Momento de inércia das máquinas candidatas	$[Kg.m^2]$
$T1$	Trajetória 1 desenvolvida pelo indivíduo 1	
$T2$	Trajetória 2 desenvolvida pelo indivíduo 1	
$T3$	Trajetória 3 desenvolvida pelo indivíduo 1	
$T4$	Trajetória 4 desenvolvida pelo indivíduo 1	
$T5$	Trajetória 5 desenvolvida pelo indivíduo 2	
$T6$	Trajetória 6 desenvolvida pelo indivíduo 2	
$T7$	Trajetória 7 desenvolvida pelo indivíduo 2	
$T8$	Trajetória 8 desenvolvida pelo indivíduo 2	
$M1$	Máquina de indução candidata 1	
$M2$	Máquina de indução candidata 2	
$M3$	Máquina de indução candidata 3	
$M4$	Máquina de indução candidata 4	
$M5$	Máquina de indução candidata 5	
$M6$	Máquina de indução candidata 6	
$M7$	Máquina de indução candidata 7	

Lista de Abreviações

FS	Fator de serviço
GDL	Grau de liberdade
LME	Lesões músculo-esqueléticas
MIT	Motor de indução trifásico
$WDSS$	*Wireless Dynamics Sensor System*
NED	*North, East, Down*
BIC	Blindagem individual e coletiva
PWM	*Pulse Width Modulation*

Sumário

Lista de Símbolos **xxiii**

Lista de Abreviações **xxvii**

1 Introdução **1**

1.1 Objetivos 3

1.2 Estrutura da Dissertação 4

2 Revisão de Literatura **5**

2.1 Exoesqueletos Robóticos 5

2.2 Tipos de Atuadores e Transmissão de Potência 9

2.3 Acionamento por meio de motor de indução trifásico . . . 12

2.4 Considerações Finais 13

3 Modelo dinâmico dos manipuladores robóticos **17**

3.1 Equações do Modelo Dinâmico do Manipulador Robótico . 24

3.1.1 Equação de Torque da Junta 1 25

3.1.2 Equação de Torque da Junta 2 26

3.1.3 Equação de Torque da Junta 3 26

3.1.4 Equação de Torque da Junta 4 27

3.2 Considerações Finais 29

4 Determinação das trajetórias dos manipuladores robóticos **31**

4.1 Considerações Finais 51

5 Especificação dos elementos de potência dos manipuladores robóticos 53

5.1 Determinação das razões de transmissão 54

5.2 Estimação dos parâmetros dos modelos das máquinas de indução propostas 56

5.3 Avaliação do máximo conjugado disponibilizado pelas máquinas frente ao máximo conjugado demandado na aplicação 64

5.4 Avaliação da região de linearidade entre corrente de estator e conjugado para cada uma das máquinas candidatas à aplicação 67

5.5 Controle Vetorial com Orientação Indireta de Campo pelo Fluxo de Rotor 69

5.6 Avaliação da temperatura alcançada pelas máquinas 78

5.6.1 Cálculo das resistências do circuito térmico de estator 86

5.6.2 Cálculo das resistências do circuito térmico de rotor 87

5.6.3 Correção das resistências térmicas em função da velocidade de operação da máquina 89

5.7 Avaliação da energia consumida pelas máquinas candidatas 93

5.8 Síntese dos resultados 94

5.9 Especificação dos conversores de frequência 97

5.9.1 Proteção 101

5.10 Considerações Finais 103

6 Construção dos manipuladores 105

6.1 Soluções para a atenuação de ruídos nos manipuladores robóticos 112

6.2 Sistema de Controle e Instrumentação do Exoesqueleto Robótico 116

6.3 Considerações Finais 117

7 Conclusões 119

7.1 Discussões Finais 119

7.2 Trabalhos Futuros 121

Referências Bibliográficas **123**

A Diagramas de Comando e Força dos Manipuladores Robóticos **131**

A.1 Diagrama de Comando dos Manipuladores Robóticos . . . 131

A.2 Diagrama de Força dos Manipuladores Robóticos 133

Capítulo 1

Introdução

> *"Far better it is to dare mighty things, to win glorious triumphs, even though checkered by failure, than to rank with those poor spirits who neither enjoy much nor suffer much, because they live in that grey twilight that knows neither victory nor defeat."*
>
> *Theodore Roosevelt*

---

[a]É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.

O corpo humano possui capacidade para executar tarefas complexas, com boa dinâmica e realizando movimentos suaves, características desejadas em qualquer robô; entretanto, é limitado pela força muscular e pela fadiga. Lesões músculo esqueléticas (LME) são os problemas de saúde mais comuns relacionados com o trabalho na Europa, afetando milhões de trabalhadores (Martinez *et al.*, 2008). Mundialmente, existe uma preocupação crescente com as consequências econômicas e sociais destes distúrbios, especialmente na esfera do trabalho (Buckle e Jason Devereux, 2002; Melhorn, 1998; Melhorn e Gardner, 2004; NRC, 2001; Muggleton *et al.*, 1999).

Em nível mundial, aproximadamente 37% dos casos de dores lombares

são atribuídas a causas de origem ocupacional (Punnett *et al.*, 2005). No Brasil, as atividades que demandam o deslocamento de cargas por tração humana envolvem um grande número de trabalhadores. Dentre estas atividades, pode-se destacar a construção civil, a coleta de materiais para reciclagem e o trabalho rural, os quais empregam, respectivamente, aproximadamente 6,4% (Santana e Oliveira, 2004), 1% (MNCMR, 2008) e 21,1% (Pereira *et al.*, 2007) da população economicamente ativa do país.

O ato de elevar, puxar ou empurrar manualmente um objeto tem sido uma preocupação contínua daqueles que planejam o uso eficaz da força de trabalho, e também daqueles que procuram prevenir lesões e doenças ocupacionais. O manuseio de cargas é predominante em muitas empresas e está associado à causa ou ao agravamento dos distúrbios músculos esqueléticos em um grande número de trabalhadores. O risco de uma lesão por sobrecarga na região lombar e torácica é evidente (Chaffin *et al.*, 2001).

Diversos autores mostram que o transporte manual de cargas pode ter consequências graves para a saúde dos trabalhadores. Segundo Chaffin *et al.* (2001), pesquisas indicam que ocorre um aumento significativo de lesões músculo esqueléticas e aparecimento de fadiga com a variação dos seguintes fatores: carga, volume, posição, frequência e duração da atividade. Kroemer e Grandjean (1998) assinalam que 20% dos afastamentos do trabalho e 50% das solicitações de aposentadorias precoces têm como origem lesões nos discos intervertebrais. Carneiro (1997) enfatiza que a Previdência Social brasileira reconhece que as lesões do sistema músculo esquelético constituem-se como as mais importantes causas das doenças ocupacionais, sendo responsáveis por 70% dos afastamentos do trabalho (Reis *et al.*, 2000).

Apesar da evolução tecnológica ter trazido consigo uma infinidade de equipamentos e dispositivos mecânicos para auxiliar o trabalhador, existem atividades que ainda dependem puramente do esforço físico do homem. Dentre estas, encontram-se a manipulação e transporte manual de cargas, sendo que algumas situações clássicas são: a carga e a descarga de cami-

nhões, atividades de construção civil, a agropecuária e a coleta de materiais recicláveis. Em trabalhos não estruturados, especialmente em indústrias de serviços, a automação é de difícil implantação (Chaffin *et al.*, 2001).

No caso da indústria, apesar dos diversos meios de transporte mecanizados (gruas, guinchos, pontes rolantes, elevadores, correias transportadoras, etc.) existentes, um grande número de insumos ainda precisa de algum tipo de transporte manual para chegar ao seu local de aplicação. Segundo a CLT, Art. 198 - é de 60 (sessenta) quilogramas o peso máximo que um empregado pode remover individualmente, ressalvadas as disposições especiais relativas ao trabalho do menor e da mulher. A NR-17, item 17.2.2 prescreve que:

> **"Não deverá ser exigido, nem admitido o transporte manual de cargas, por um trabalhador, cujo peso seja suscetível de comprometer sua saúde e segurança".**

Contudo, grande parte dos materiais de construção e cargas transportadas manualmente em indústrias têm pesos acima do que seria recomendado para o transporte manual.

Apesar dos problemas listados, pode-se dizer que a contribuição científica na área ainda é escassa. A prevenção das LMEs deve começar a partir de ações que podem ser tomadas no local de trabalho. Existem alguns passos de prevenção em primeiro nível, algumas técnicas de reabilitação para os trabalhadores que já têm LME que podem ser aplicados em paralelo, mas, além disso, a ajuda de dispositivos tecnológicos deve ser considerada e incentivada.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é atender a essas demandas previamente apresentadas por meio de uma metodologia de especificação de motores de indução trifásicos, atuadores dos manipuladores robóticos, e a posterior construção da estrutura mecatrônica de potência de um exoesqueleto robótico de membros superiores à base de acionamento elétrico. As referências

de velocidade e conjugado serão geradas por meio do processamento das informações de intenção de movimento dos seus usuários e considerando as demandas de uso de públicos específicos, com o objetivo de multiplicação de força para realização de tarefas pesadas como, por exemplo, o levantamento e transporte de cargas.

1.2 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho é dividido em 5 capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito de sistemas e exoesqueletos robóticos e formas de especificação de motores. É feita a apresentação de trabalhos recentes publicados na área e uma discussão sobre os mesmos.

O Capítulo 3 consiste da apresentação da metodologia empregada neste trabalho, no que tange a modelagem dos manipuladores robóticos, a determinação de trajetórias possíveis para os mesmos, a estimação dos parâmetros das máquinas de indução a partir de dados de catálogo, a especificação das máquinas utilizadas e a construção dos manipuladores.

No Capítulo 4 são mostrados os principais resultados obtidos com a realização deste trabalho e, no Capítulo 5, são expostas as conclusões e as propostas de continuidade do trabalho.

Capítulo 2

Revisão de Literatura

> *"Those who fall in love with practice without science are like a sailor who enters a ship without a helm or a compass, and who never can be certain whither he is going."*
>
> *Leonardo da Vinci*

[a]Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.

Este capítulo apresenta alguns importantes trabalhos realizados nos últimos anos referentes a sistemas robóticos e exoesqueletos, suas aplicações, suas especificidades e discussões em relação à aplicação de exoesqueletos no meio industrial.

2.1 Exoesqueletos Robóticos

Exoesqueleto é um termo que é definido pela Zoologia como sendo uma estrutura exterior e rígida presente em alguns animais invertebrados, especialmente artrópodes, a qual provê tanto suporte quanto proteção (Furtado, 2007). Desta forma, consideram-se exoesqueletos robóticos os mecanismos artificiais vestidos externamente ao corpo que atuam paralelamente ao membro humano com os objetivos de estender, complementar, restau-

rar ou melhorar as funções e capacidades humanas (Forner-Cordero *et al.*, 2008).

De acordo com Perry *et al.* (2007), um mesmo dispositivo com diferentes algoritmos de controle pode ser utilizado em quatro modos de operação fundamentais, os quais são:

1. Fisioterapia: O paciente vestindo um exoesqueleto desenvolve terapia física ou ocupacional baseado em tarefas executadas de forma ativa ou passiva (Fasoli *et al.*, 2003; Krebs *et al.*, 2002; Hogan *et al.*, 1992).

2. Dispositivo assistivo (Amplificador Humano): O operador sente cargas reduzidas enquanto interage com objetos no ambiente, sendo a maior parte da carga transportada pelo exoesqueleto (Repperger *et al.*, 1996; Kazerooni, 1996).

3. Dispositivo háptico: O indivíduo interage fisicamente com objetos virtuais, enquanto forças geradas pela interação são realimentadas de volta para o usuário por meio do exoesqueleto de forma a transmitir a forma, rigidez, textura, ou outras características desses objetos (Frisoli *et al.*, 2005; Bergamasco *et al.*, 1994).

4. Dispositivo mestre: Substituindo o ambiente virtual por um robô real, o operador usa o exoesqueleto para controlar um sistema robótico numa teleoperação num modo (mestre/escravo), onde o exoesqueleto reflete de volta para o usuário as forças geradas conforme o robô escravo interage com o ambiente (Caldwell *et al.*, 1995).

O conceito de um dispositivo que pudesse aumentar a força humana utilizando o seu intelecto como controle supervisório existe desde o início da década de 60, conforme descrito em Snyder e Kazerooni (1996). Uma das primeiras tentativas foi realizada pela *General Eletric* de 1966 a 1971, no qual foi desenvolvido o conceito de um amplificador humano por meio de protótipo, desenvolvimento e testes. O amplificador humano conhecido como “Hardiman” era um sistema de dois exoesqueletos sobrepostos vesti-

dos por um humano (Snyder e Kazerooni, 1996; Mosher, 1967). A Figura 2.1 apresenta este sistema.

Figura 2.1: Exoesqueleto amplificador de força humana conhecido como Hardiman. Fonte: (Mosher, 1967).

A partir daí, diversas outras pesquisas foram desenvolvidas com o objetivo de criar exoesqueletos que auxiliassem na amplificação da força humana, tal como pode ser visto em Kazerooni (2005), onde, com o BLEEX, um exoesqueleto energeticamente autônomo de membros inferiores, é possível se desenvolver uma velocidade de 3,2 Km/h enquanto uma carga de 34 Kg é carregada. Um outro exemplo pode ser encontrado em Marcheschi *et al.* (2011), onde o PERCRO, um exoesqueleto completo, também é desenvolvido com o objetivo de amplificação da força humana.

As Figuras 2.2a e 2.2b ilustram um exoesqueleto robótico de membros inferiores e um exoesqueleto completo, ambos utilizados para a amplificação da força humana.

Há ainda muitos outros estudos envolvendo exoesqueletos desenvolvidos e em desenvolvimento nos dias de hoje, o que mostra sua grande aplicabilidade nas mais diversas áreas. Um exoesqueleto autônomo, subatuado,

(a) Exoesqueleto robótico de membros inferiores BLEEX.

(b) Exoesqueleto robótico completo PERCRO.

Figura 2.2: Exoesqueletos robóticos de membros utilizados para amplificação de força humana.
Fonte: (Kazerooni, 2005) e (Marcheschi *et al.*, 2011).

para amplificação de força no transporte de carga foi desenvolvido no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) e é apresentado por Walsh *et al.* (2006). Kawamoto *et al.* (2003) apresenta o HAL (*Hybrid Assistive Leg*), ou, "Perna assistiva híbrida", que é um exoesqueleto de membros inferiores que utiliza sinais eletromiográficos e foi criado para auxiliar pessoas que possuem alterações na marcha. Na área de reabilitação foram desenvolvidos também o L-EXOS (*Light Exoskeleton*) e o HuREx (*Human-inspired Robotic Exoskeleton*), desenvolvidos por Frisoli *et al.* (2007) e McDaid *et al.* (2013), respectivamente. O L-EXOS é um exoesqueleto de membros superiores que pode ser utilizado para a interação humana com ambientes virtuais e tarefas de teleoperação, com o objetivo de reabilitar pessoas que sofreram acidentes cerebrais. Já o HuREx é um exoesqueleto robótico inspirado pelo sistema músculo esquelético humano e foi desenvolvido para a

reabilitação de membros inferiores.

Partindo para o meio industrial, exoesqueletos têm um amplo potencial de uso como multiplicadores da força dos usuários, pois, como já foi dito, existem sérias limitações na carga que pode ser carregada por um ser humano. Em diversas situações, essa limitação é eliminada por meio do uso de máquinas externas como empilhadeiras ou talhas de içamento. Porém, algumas vezes o processo pode demandar movimentos que se assemelhem aos feitos por seres humanos, como, por exemplo, ao retirar uma saca de café inicialmente do chão e colocá-la sobre as pás da empilhadeira. Isso usualmente é feito por carregadores humanos e que podem ter seus limites de carregamento de carga excedidos mesmo nesse simples movimento. Nestes casos, o uso de um exoesqueleto de membros superiores para multiplicar a força do carregador pode suprir tal demanda (Kazerooni, 1998).

Em muitas aplicações, justifica-se o uso de exoesqueletos e não de robôs autônomos, pois o controle de equilíbrio em robôs autônomos é bastante complexo, sendo um dos principais problemas enfrentados hoje no seu desenvolvimento, enquanto o ser humano possui um controle praticamente perfeito do equilíbrio do corpo. Por sua vez, a multiplicação de força já citada anteriormente por um sistema robótico é um grande benefício e torna-se, então, uma boa possibilidade de avanço a combinação dos dois sistemas. O controle dos seres humanos combinado à força proporcionada pelos exoesqueletos pode proporcionar as vantagens de ambos os sistemas (Rosen e Perry, 2007).

2.2 Tipos de Atuadores e Transmissão de Potência

Diversos são os tipos de atuadores utilizados em exoesqueletos robóticos, como por exemplo: elétricos, pneumáticos e hidráulicos. Segundo Gopura e Kiguchi (2009), exoesqueletos robóticos de membros superiores podem ser classificados em relação ao tipo de atuador utilizado. Estes podem ser classificados como:

a) Tipo A - atuados por motores elétricos;

b) Tipo B - atuados por músculos pneumáticos;

c) Tipo C - atuados por potência hidráulica.

Uma breve revisão em relação a exoesqueletos robóticos de membros superiores foi realizada por Gopura *et al.* (2011), onde o mesmo avalia diversas características de manipuladores desenvolvidos e, dos manipuladores analisados por ele, mais de 65% utilizaram motores elétricos como atuadores, cerca de 27% eram atuados pneumaticamente e o restante eram atuados hidraulicamente ou por outros meios.

Para Gopura *et al.* (2011), motores elétricos são normalmente utilizados como atuadores de exoesqueletos robóticos por possuírem alta velocidade, precisão e a capacidade de serem utilizados em controles avançados de movimento. Apenas um pequeno número de exoesqueletos utilizam atuadores pneumáticos, pois mantém a área de trabalho limpa e podem ser interrompidos sob carga, mas possuem baixa precisão no controle de velocidade. Por fim, Gopura *et al.* (2011) conclui que embora atuadores hidráulicos sejam capazes de gerar altos torques de forma rápida e precisa, os mesmos possuem as desvantagens de vazamentos de óleo, necessidade de um espaço amplo e uma linha de retorno de óleo; desta forma, atuadores hidráulicos são raramente utilizados em exoesqueletos robóticos de membros superiores.

Com relação à forma de transmissão de potência, diversas são as opções possíveis. Segundo Gopura e Kiguchi (2009), esta transmissão pode ser feita por cabos, engrenagens, mecanismo composto por elos e acoplamento direto, dentre outras possibilidades. Um exemplo de manipulador robótico utilizando cabos como forma de transmissão de potência é mostrado na Figura 2.3.

A construção dos exoesqueletos tem seguido algumas linhas tradicionais. O uso de motores elétricos nos lugares das articulações é bastante comum, como no sistema proposto por Vertechy *et al.* (2009), que traz

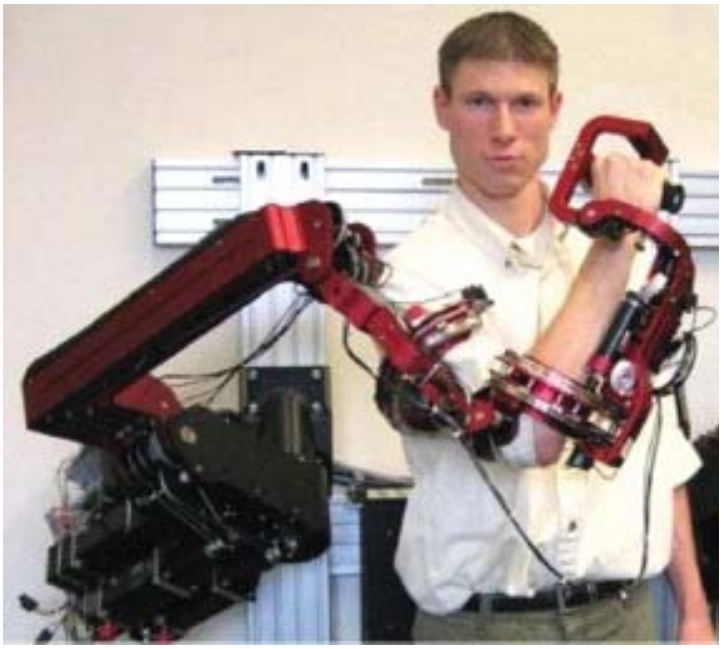


Figura 2.3: Exoesqueleto de membro superior utilizando cabos.
Fonte: (Perry *et al.*, 2007).

algumas vantagens como, por exemplo, a aplicação de torque diretamente na articulação que se pretende movimentar.

Uma forma interessante de se transmitir torque à articulação é por meio de um sistema de cabos de transmissão, num sistema inspirado nos tendões do corpo humano (Perry *et al.*, 2007). A utilização de cabos de transmissão traz a grande vantagem de se posicionar os motores de acionamento fora das articulações, o que pode gerar uma melhor distribuição de peso do exoesqueleto. Particularmente, a colocação dos motores de acionamento fora do exoesqueleto traz um ganho no peso do conjunto que deverá ser suportado.

Motores de corrente contínua são comuns no acionamento de exoesqueletos. A facilidade do controle desse tipo de máquina justifica seu uso. A construção se assemelha ao de um servo acionamento, onde, além do motor, há também sensores para se identificar a posição do motor, suas rotações e outros parâmetros, possibilitando um controle mais preciso da movimentação. Este tipo de motor apresenta algumas desvantagens, como apresentado por Kazerooni (1998) e Vertechy *et al.* (2009), que é o custo

relativamente alto, tornando o preço total do exoesqueleto muito maior. Outra desvantagem que deve ser citada são os custos de manutenção destas máquinas, igualmente elevados.

2.3 Acionamento por meio de motor de indução trifásico

Uma alternativa ainda não muito explorada seria a utilização de motores de indução trifásicos. Um sistema robótico utilizando tais motores foi desenvolvido por Silva (2014). Este trabalho consiste numa metodologia completa para projeto e implementação de um acionamento elétrico embarcado para auxílio à tração humana em sistemas de transporte de carga. Assim como os exoesqueletos, esta solução visa agregar a capacidade de produção de força mecânica de acionamentos elétricos com a capacidade do cérebro humano para determinação das referências de trajetórias que são impostas ao acionamento.

A metodologia apresentada por Silva (2014) propõe a utilização de uma máquina de indução trifásica para o acionamento de um sistema de cooperação homem-robô, o Veccar. Esta solução tem um viés social, pois, como apresentado pelo mesmo, diversas atividades profissionais no Brasil demandam o deslocamento de cargas por veículos tracionados por humanos, expondo um grande número de trabalhadores a desgastes e lesões de origem músculo esqueléticas. Inicialmente, visando especificar os elementos de potência do veículo, e, utilizando-se de uma unidade integrada de sensoriamento, foi monitorada a rotina real de 13 dias de trabalho dos catadores de papel de São João del-Rei. Neste monitoramento, foram coletados dados de força de tração exercida pelos catadores, velocidade e altitude do veículo. Além disso, foi obtido um perfil de massa no tempo por meio do armazenamento em sacos plásticos numerados das massas embarcadas a cada parada do veículo.

O autor propõe que, para garantir o controle do sistema com bom de-

sacoplamento de componentes vetoriais e consequentemente boa resposta dinâmica, e também assegurar que o motor não se queime durante os ciclos de trabalho, deverá ser selecionado para a aplicação o motor elétrico que consuma menos energia para desempenhar o trabalho desenvolvido nos ciclos monitorados e que atenda simultaneamente as três condições apresentadas a seguir:

- o motor deverá possuir conjugado máximo maior que o conjugado máximo da aplicação;
- para operação com conversor 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 isolação.

Uma lista de máquinas candidatas para acionamento do Veccar foi criada e, por meio de metodologia específica e de dados de catálogos, seus parâmetros dos circuitos elétricos equivalentes foram obtidos. Simulações foram realizadas em cada uma dessas máquinas, comparando seus desempenhos para que fosse possível a especificação da máquina que acionaria o Veccar.

Nas Figuras 2.4a e 2.4b são apresentadas uma vista do Veccar modelado em *SolidWorks* e o Veccar construído sendo utilizado em um teste.

2.4 Considerações Finais

O presente Capítulo apresentou alguns trabalhos na área de exoesqueletos e sistemas robóticos de maneira geral; apresentando os tipos de atuadores e formas de transmissão de potência utilizados, além de características específicas de cada um dos trabalhos desenvolvidos.

Percebeu-se diante do que foi exposto que a busca por sistemas robóticos com o objetivo de amplificação de força humana vem de décadas, e que

(a) Vista do Veccar modelado em *SolidWorks*.

(b) Veccar construído sendo utilizado em um teste.

Figura 2.4: Veccar modelado em *SolidWorks* e Veccar construído.

estes são de grande importância em diversas áreas e são utilizados com os mais diversos objetivos. Dentre os trabalhos apresentados, destacaram-se os desenvolvidos por: Kazerooni (2005), que apresenta um exoesqueleto energeticamente autônomo de membros inferiores e que utiliza atuadores hidráulicos; o trabalho de Marcheschi *et al.* (2011), que relata a construção de um exoesqueleto robóticos de membros superiores e inferiores, com o objetivo de amplificação de força, com muitos graus de liberdade, e que utiliza atuadores elétricos. Perry *et al.* (2007), o qual expõe uma forma de transmissão de potência muito interessante, utilizando cabos de aço e, por fim, o trabalho de Silva (2014) que utiliza uma alternativa ainda não muito explorada, com motores de indução trifásicos, os quais são robus-

tos e de baixo custo, quando comparados os mais comumente utilizados servoacionamentos.

Nesse sentido, dentro do que foi evidenciado, verificou-se uma grande oportunidade de contribuição na área, desenvolvendo um exoesqueleto robótico que utilize motores elétricos como atuadores das juntas do exoesqueleto, utilize conjuntos de polias e correias e polias e cabos de aço para a transmissão de potência, tomando-se como referência principal o que foi apresentado no trabalho desenvolvido por Silva (2014); todavia as devidas alterações foram realizadas, para que se respeitasse as especificidades dos manipuladores desenvolvidos neste trabalho.

Assim, a presente dissertação apresenta uma metodologia de especificação do acionamento elétrico para dois manipuladores robóticos de membros superiores com 4 graus de liberdade cada e a construção dessa estrutura mecatrônica de potência.

Capítulo 3

Modelo dinâmico dos manipuladores robóticos

"If we knew what it was we were doing, it would not be called research, would it?"

Albert Einstein

---

[a]Se soubéssemos o que era aquilo que estávamos fazendo não seria chamado pesquisa, seria?

Diversas são as técnicas disponíveis para modelagem de sistemas. Para os manipuladores é utilizada a formulação de Euler-Lagrange, a qual fornece um modelo dinâmico para os mesmos. Segundo Siliciano *et al.* (2009), o modelo dinâmico de um manipulador fornece a descrição da relação entre os torques de atuação das juntas e movimento da estrutura.

Ainda segundo Siliciano *et al.* (2009), com a *Formulação de Lagrange*, as equações de movimento podem ser obtidas de forma sistemática e de forma independente do sistema de referência de coordenadas. Uma vez que um conjunto de variáveis $q_i, i = 1,...,n$, chamadas de *coordenadas generalizadas* e que descrevem a posição dos elos de um manipulador de n graus de liberdade, são escolhidas de forma eficaz, o *Lagrangiano* do sistema mecânico pode ser definido como função das coordenadas generalizadas:

$$L(\overrightarrow{q}, \overrightarrow{\dot{q}}) = K(\overrightarrow{q}, \overrightarrow{\dot{q}}) - V(\overrightarrow{q}) \tag{3.1}$$

onde o Lagrangiano do sistema é a diferença entre a energia cinética total K e a energia potencial total do sistema V (Spong e Vidyasagar, 1989).

E assim, a equação de Lagrange pode ser expressa como:

$$\overrightarrow{\tau} = \frac{d}{dt}(\frac{\partial L}{\partial \overrightarrow{\dot{q}}}) - \frac{\partial L}{\partial \overrightarrow{q}} \tag{3.2}$$

onde $L(\overrightarrow{q}, \overrightarrow{\dot{q}})$ é o Lagrangiano do sistema e $\overrightarrow{\tau}$ o vetor de força generalizada correspondente ao vetor de coordenadas generalizadas $\overrightarrow{q}$.

A energia cinética total K armazenada é dada pela soma da energia cinética de cada elo, K_i. A energia cinética de cada elo pode ser vista como a soma de uma energia cinética de translação, obtida ao se concentrar toda a massa do corpo no seu centro de massa e uma energia cinética de rotação:

$$K_i = \frac{1}{2}\overrightarrow{v_i}^T m_i \overrightarrow{v_i} + \frac{1}{2}\overrightarrow{w_i}^T I_i \overrightarrow{w_i} \tag{3.3}$$

onde:

m_i é a massa;
$\overrightarrow{v_i}$ é o vetor velocidade linear do centro de massa;
$\overrightarrow{v_i}^T$ é o vetor velocidade linear do centro de massa transposto;
$\overrightarrow{w_i}$ é o vetor velocidade angular da junta;
$\overrightarrow{w_i}^T$ é o vetor velocidade angular da junta transposto;
I_i é o tensor de inércia de cada elo "i" dos manipuladores.

Para o cálculo da energia potencial V, considera-se que o robô é rígido e que, portanto, a única fonte de energia potencial é a gravidade. A energia potencial total é dada pela soma da energia potencial de cada elo, V_i, e

para que a mesma seja calculada, considera-se que toda a massa do elo "i" está localizada em seu centro de massa, de forma que:

$$V = \sum_{i=1}^{n} m_i \overrightarrow{g}^T \overrightarrow{r_i} \tag{3.4}$$

onde $\overrightarrow{g}$ é o vetor indicando a direção da gravidade em relação ao sistema de coordenadas inercial transposto e $\overrightarrow{r_i}$ é o vetor posição do centro de massa de cada elo "i" dos manipuladores.

Finalmente, utilizando a formulação descrita acima e também apresentada por Choset *et al.* (2005), a qual modela corpos rígidos no espaço, pode-se representar o modelo do robô por uma equação chamada Equação Canônica ou Equação na Forma Normal, como mostrado na Equação 3.5:

$$\overrightarrow{\tau} = M(\overrightarrow{q})\ddot{\overrightarrow{q}} + C(\overrightarrow{q}, \dot{\overrightarrow{q}})\dot{\overrightarrow{q}} + g(\overrightarrow{q}) \tag{3.5}$$

Sendo que:

$M(\overrightarrow{q}) \in R^{n_q}$ x R^{n_q} é uma matriz simétrica definida positiva, chamada de matriz de massa ou matriz de inércia;

$C(\overrightarrow{q}, \dot{\overrightarrow{q}}) \in R^{n_q}$ x R^{n_q} é uma matriz de termos centrífugos e de Coriolis, obtida a partir de $M(\overrightarrow{q}, \dot{\overrightarrow{q}})$;

$g(\overrightarrow{q}) \in R^{n_q}$ é o vetor gradiente da Energia Potencial total do robô;

$\overrightarrow{\tau} \in R^{n_q}$ é o vetor de forças generalizadas não-conservativas, onde estão incluídas forças externas e forças de atrito.

A Figura 6.1 ilustra a ideia inicial para a estrutura e a configuração mecânica especificada para os manipuladores do exoesqueleto, sendo cada manipulador composto por 4 juntas (graus de liberdade), $Junta_1$, $Junta_2$, $Junta_3$ e $Junta_4$. Esta Figura ilustra ainda os conversores de frequência, motores e *encoders* empregados. São utilizadas reduções para cada um dos motores de forma a aumentar o torque disponível para as juntas, sendo

que no eixo de saída destas são conectadas polias, as quais estão ligadas às polias do braço por meio de cabos de aço.

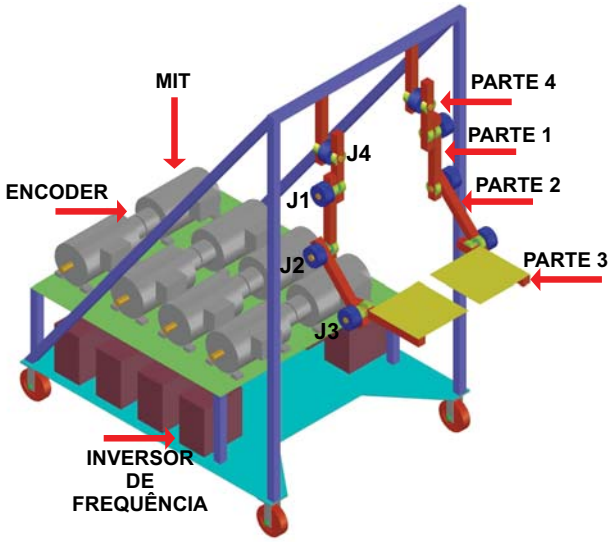


Figura 3.1: Estrutura e manipulador robótico inicialmente propostos.

Neste trabalho, utiliza-se o modelo dinâmico para a determinação dos torques nas juntas dos manipuladores robóticos, em função de parâmetros geométricos e de distribuição de massa, além das configurações mecânicas que caracterizam este no espaço.

Para a caracterização deste modelo deve-se, a princípio, distinguir as partes constituintes dos manipuladores. Neste estudo, para a modelagem dos manipuladores é considerado que cada um destes é constituído de 4 corpos, os quais podem ser vistos nas Figuras 3.2 e 3.3.

Conforme apresentado por Norton (2011), qualquer corpo rígido no espaço tridimensional possui 6 GDL, ou seja, pode ser caracterizado por 6 variáveis: 3 relativas à translação do corpo em três eixos perpendiculares, combinadas a 3 relativas à rotação do corpo em três eixos perpendiculares, usualmente referenciadas por rolamento, arfagem e guinada. As Figuras 3.2 e 3.3 ilustram as configurações relativas às posições dos centros de massa e das variáveis de atitude de cada um dos corpos dos manipuladores.

Desta forma, como cada um dos manipuladores é subdividido em 4 corpos, seriam necessárias 24 variáveis de configuração para descrever totalmente a orientação no espaço de cada um destes. Entretanto, não é

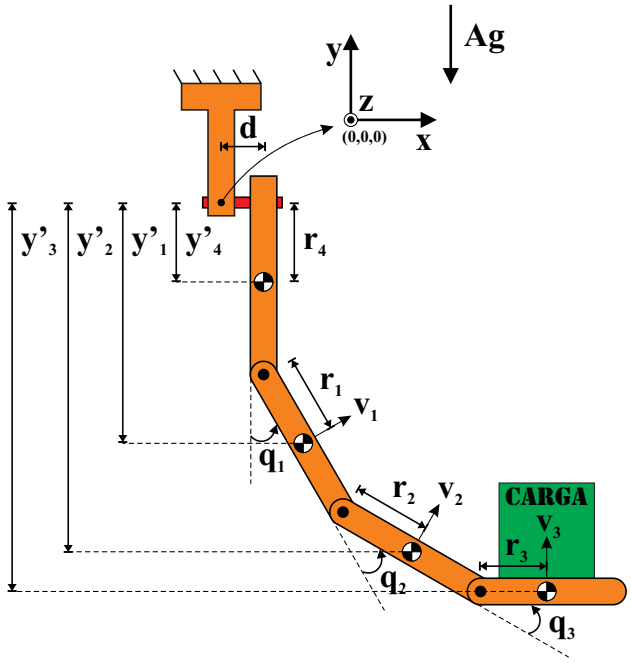


Figura 3.2: Configurações do centro de massa e dos ângulos de atitude dos manipuladores - Vista Lateral.

permitido aos corpos constituintes dos manipuladores que estes tenham todos os movimentos possíveis, ou seja, estes possuem algumas restrições holonômicas, o que leva a uma redução no número de variáveis necessárias para a descrição destes corpos. As restrições de cada um dos manipuladores é apresentada a seguir:

- Nenhum dos 4 corpos pode guinar, pois eles são mecanicamente impedidos de realizar tal movimento. Esta restrição reduz o número de variáveis de configuração de 24 para 20;

- 3 dos 4 corpos não podem rolar, pois eles também são mecanicamente impedidos de realizar tal movimento. Esta restrição reduz o número de variáveis de configuração de 20 para 17;

- 1 dos 4 corpos não pode arfar, pois ele também é mecanicamente impedido de realizar tal movimento. Esta restrição reduz o número de variáveis de configuração de 17 para 16, 12 variáveis relativas às

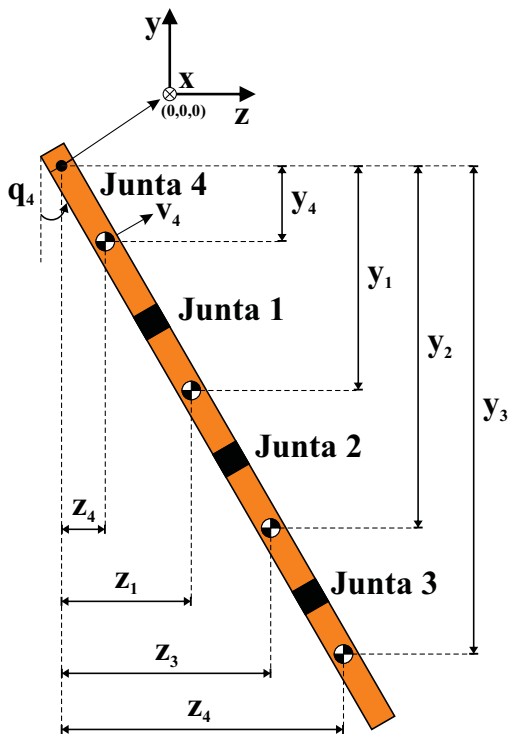


Figura 3.3: Configurações do centro de massa e dos ângulos de atitude dos manipuladores - Vista Posterior.

posições dos centros de massa dos corpos e 4 relativas aos ângulos de atitude dos mesmos;

- como todos os corpos são rígidos, ou seja, têm suas dimensões constantes, é possível, a partir das configurações de atitude, determinar as posições x, y e z de cada um dos 4 corpos em relação a um referencial inercial, reduzindo desta forma o número de variáveis de configuração de 16 para 4.

A seguir são descritas as posições dos centros de massa de cada um dos corpos de cada manipulador, a partir das 4 configurações de atitude que são utilizadas no modelo.

Corpo 1

$$X_{CM1} = d + r_1.sen(q_1) \tag{3.6}$$

$$Y_{CM1} = -(2r_4 + r_1.cos(q_1))cos(q_4) \tag{3.7}$$

$$Z_{CM1} = (2r_4 + r_1.cos(q_1))sen(q_4) \tag{3.8}$$

Corpo 2

$$X_{CM2} = d + 2r_1.sen(q_1) + r_2.sen(q_1 + q_2) \tag{3.9}$$

$$Y_{CM2} = -(2r_4 + 2r_1.cos(q_1) + r_2.cos(q_1 + q_2))cos(q_4) \tag{3.10}$$

$$Z_{CM2} = (2r_4 + 2r_1.cos(q_1) + r_2.cos(q_1 + q_2))sen(q_4) \tag{3.11}$$

Corpo 3

$$X_{CM3} = d + 2r_1.sen(q_1) + 2r_2.sen(q_1 + q_2) + r_3.sen(q_1 + q_2 + q_3) \tag{3.12}$$

$$Y_{CM3} = -(2r_4 + 2r_1.cos(q_1) + 2r_2.cos(q_1 + q_2) + r_3.cos(q_1 + q_2 + q_3))cos(q_4) \tag{3.13}$$

$$Z_{CM3} = (2r_4 + 2r_1.cos(q_1) + 2r_2.cos(q_1 + q_2) + r_3.cos(q_1 + q_2 + q_3))sen(q_4) \tag{3.14}$$

Corpo 4

$$X_{CM4} = d \tag{3.15}$$

$$Y_{CM4} = -r_4.cos(q_4) \tag{3.16}$$

$$Z_{CM4} = r_4.sen(q_4) \tag{3.17}$$

A partir das posições dos centros de massa de cada um dos corpos de cada manipulador e das dimensões destes, foram calculadas as velocida-

des lineares e angulares de cada um dos elos, para posterior obtenção das energias cinéticas e potenciais, do lagrangiano do sistema e das equações de torque de cada uma das juntas dos manipuladores, sendo utilizado para tal o *software* Wolfram *Mathematica*® 9.

Na Equação 3.18 é mostrado o Lagrangiano obtido para o sistema.

$$
\begin{aligned}
L &= a_g m_4 r_4 \cos(q_4) + a_g m_1 (2r_4 \cos(q_4) + r_1 \cos(q_1)\cos(q_4)) + \\
&+ a_g m_2 (2r_4 \cos(q_4) + 2r_1 \cos(q_1)\cos(q_4) + r_2 \cos(q_1+q_2)\cos(q_4)) + \\
&+ a_g m_3 (2r_4 \cos(q_4) + 2r_1 \cos(q_1)\cos(q_4) + 2r_2 \cos(q_1+q_2)\cos(q_4) + r_3 \cos(q_1+q_2+q_3)\cos(q_4)) + \\
&+ 0{,}5J_1\dot{q}_1{}^2 + 0{,}5J_2\dot{q}_2{}^2 + 0{,}5J_3\dot{q}_3{}^2 + 0{,}5J_4\dot{q}_4{}^2 + 0{,}5m_1r_1{}^2\dot{q}_1{}^2 + 2m_2r_1{}^2\dot{q}_1{}^2 + 2m_3r_1{}^2\dot{q}_1{}^2 + \\
&+ 2m_2r_1r_2\cos(q_2)\,\dot{q}_1{}^2 + 4m_3r_1r_2\cos(q_2)\,\dot{q}_1{}^2 + 0{,}5m_2r_2{}^2\dot{q}_1{}^2 + 2m_3r_2{}^2\dot{q}_1{}^2 + \\
&+ 2m_3r_1r_3\cos(q_2+q_3)\,\dot{q}_1{}^2 + 2m_3r_2r_3\cos(q_3)\,\dot{q}_1{}^2 + 0{,}5m_3r_3{}^2\dot{q}_1{}^2 + 2m_2r_1r_2\cos(q_2)\,\dot{q}_1\dot{q}_2 + \\
&+ 4m_3r_1r_2\cos(q_2)\,\dot{q}_1\dot{q}_2 + m_2r_2{}^2\dot{q}_1\dot{q}_2 + 4m_3r_2{}^2\dot{q}_1\dot{q}_2 + 2m_3r_1r_3\cos(q_2+q_3)\,\dot{q}_1\dot{q}_2 + \\
&+ 4m_3r_2r_3\cos(q_3)\,\dot{q}_1\dot{q}_2 + m_3r_3{}^2\dot{q}_1\dot{q}_2 + 0{,}5m_2r_2{}^2\dot{q}_2{}^2 + 2m_3r_2{}^2\dot{q}_2{}^2 + 2m_3r_2r_3\cos(q_3)\,\dot{q}_2{}^2 + \\
&+ 0{,}5m_3r_3{}^2\dot{q}_2{}^2 + 2m_3r_1r_3\cos(q_2+q_3)\,\dot{q}_1\dot{q}_3 + 2m_3r_2r_3\cos(q_3)\,\dot{q}_1\dot{q}_3 + 1{,}5m_3r_3{}^2\dot{q}_3{}^2 + \\
&+ 2m_3r_2r_3\cos(q_3)\,\dot{q}_2\dot{q}_3 + m_3r_3{}^2\dot{q}_2\dot{q}_3 + 0{,}25m_1r_1{}^2\dot{q}_4{}^2 + 2m_1r_4{}^2\dot{q}_4{}^2 + 0{,}5m_4r_4{}^2\dot{q}_4{}^2 + \\
&+ 2m_1r_1r_4\cos(q_1)\,\dot{q}_4{}^2 + 0{,}25m_1r_1{}^2\cos(2.q_1)\,\dot{q}_4{}^2 + 2m_2r_4{}^2\dot{q}_4{}^2 + 4m_2r_1r_4\cos(q_1)\,\dot{q}_4{}^2 + \\
&+ 2m_2r_1{}^2\cos(q_1)^2\dot{q}_4{}^2 + 2m_3r_1{}^2\cos(q_1)^2\dot{q}_4{}^2 + 2m_2r_2r_4\cos(q_1+q_2)\,\dot{q}_4{}^2 + \\
&+ 2m_2r_1r_2\cos(q_1)\cos(q_1+q_2)\dot{q}_4{}^2 + 4m_3r_1r_2\cos(q_1)\cos(q_1+q_2)\dot{q}_4{}^2 + \\
&+ 0{,}5m_2r_2{}^2\cos(q_1+q_2)^2\dot{q}_4{}^2 + 2m_3r_2{}^2\cos(q_1+q_2)^2\dot{q}_4{}^2 + \\
&+ 2m_3r_1r_3\cos(q_1)\cos(q_1+q_2+q_3)\dot{q}_4{}^2 + 2m_3r_2r_3\cos(q_1+q_2)\cos(q_1+q_2+q_3)\dot{q}_4{}^2 + \\
&+ 0{,}5m_3r_3{}^2\cos(q_1+q_2+q_3)^2\dot{q}_4{}^2 + 2m_3r_4{}^2\dot{q}_4{}^2 + 4m_3r_1r_4\cos(q_1)\dot{q}_4{}^2 + \\
&+ 4m_3r_2r_4\cos(q_1+q_2)\dot{q}_4{}^2 + 2m_3r_3r_4\cos(q_1+q_2+q_3)\dot{q}_4{}^2
\end{aligned}
\tag{3.18}
$$

3.1 Equações do Modelo Dinâmico do Manipulador Robótico

Por fim, utilizando a *Formulação de Lagrange*, são obtidas as equações de torque de cada uma das juntas dos manipuladores robóticos, apresentadas nas subseções 3.1.1 - 3.1.4.

3.1.1 Equação de Torque da Junta 1

Na Equação 3.19 é exposta a equação canônica de torque da junta 1 do manipulador robótico.

$$\tau_1 = M_1\left(q_1,q_2,q_3,q_4\right)\ddot{q} + C_1\left(q_1,q_2,q_3,q_4,\dot{q}_1,\dot{q}_2,\dot{q}_3,\dot{q}_4\right)\dot{q} + g_1\left(q_1,q_2,q_3,q_4\right) \tag{3.19}$$

As Equações 3.20, 3.21 e 3.22 definem as parcelas de torque da junta 1, obtidas pela matriz de massa, matriz de termos centrífugos e de Coriolis, vetor gradiente da energia potencial, posições, velocidades e acelerações angulares dos manipuladores.

$$\begin{aligned}
M_1(q_1,q_2,q_3,q_4,\ddot{q}_1,\ddot{q}_2,\ddot{q}_3,\ddot{q}_4) &= \left[J_1 + m_1{r_1}^2 + m_2{r_2}^2 + m_3{r_3}^2 + 4m_2{r_1}^2 + 4m_3{r_1}^2 + 4m_3{r_2}^2 + \right.\\
&+ 4m_2r_1r_2\cos\left(q_2\right) + 8m_3r_1r_2\cos\left(q_2\right) + 4m_3r_1r_3\cos\left(q_2+q_3\right) +\\
&+ \left.4m_3r_2r_3\cos\left(q_3\right)\right].\ddot{q}_1 + \left[m_2{r_2}^2 + 4m_3{r_2}^2 + m_3{r_3}^2 + 2m_2r_1r_2\cos\left(q_2\right) + \right.\\
&+ 2m_3r_1r_3\cos\left(q_2+q_3\right) + 4m_3r_2r_3\cos\left(q_3\right) + \left.4m_3r_1r_2\cos\left(q_2\right)\right].\ddot{q}_2 +\\
&+ \left[2m_3r_1r_3\cos\left(q_2+q_3\right) + 2m_3r_2r_3\cos\left(q_3\right) + m_3{r_3}^2\right].\ddot{q}_3
\end{aligned} \tag{3.20}$$

$$\begin{aligned}
C_1(q_1,q_2,q_3,q_4,\dot{q}_1,\dot{q}_2,\dot{q}_3,\dot{q}_4) &= \left[-4m_2r_1r_2\sin\left(q_2\right) - 8m_3r_1r_2\sin\left(q_2\right) - 4m_3r_1r_3\sin\left(q_2+q_3\right)\right].\dot{q}_1\dot{q}_2 +\\
&+ \left[-2m_2r_1r_2\sin\left(q_2\right) - 4m_3r_1r_2\sin\left(q_2\right) - 2m_3r_1r_3\sin\left(q_2+q_3\right)\right].{\dot{q}_2}^2 +\\
&+ \left[-4m_3r_1r_3\sin\left(q_2+q_3\right) - 4m_3r_2r_3\sin\left(q_3\right)\right].\dot{q}_1\dot{q}_3 +\\
&+ \left[-4m_3r_1r_3\sin\left(q_2+q_3\right) - 4m_3r_2r_3\sin\left(q_3\right)\right].\dot{q}_2\dot{q}_3 +\\
&+ \left[-2m_3r_1r_3\sin\left(q_2+q_3\right) - 2m_2r_2r_3\sin\left(q_3\right)\right].{\dot{q}_3}^2 +\\
&+ \left[2m_1r_1r_4\sin\left(q_1\right) + 4m_2r_1r_4\sin\left(q_1\right) + 4m_3r_1r_4\sin\left(q_1\right) + \frac{m_1{r_1}^2\sin\left(2q_1\right)}{2} + \right.\\
&+ 2m_2{r_1}^2\sin\left(2q_1\right) + 2m_3{r_1}^2\sin\left(2q_1\right) + 2m_2r_1r_2\sin\left(2q_1+q_2\right) +\\
&+ 4m_3r_1r_2\sin\left(2q_1+q_2\right) + 2m_3r_1r_3\sin\left(2q_1+q_2+q_3\right) +\\
&+ 2m_2r_2r_4\sin\left(q_1+q_2\right) + 4m_3r_2r_4\sin\left(q_1+q_2\right) + \frac{m_2{r_2}^2\sin\left(2q_1+2q_2\right)}{2} +\\
&+ 2m_3{r_2}^2\sin\left(2q_1+2q_2\right) + 2m_3r_2r_3\sin\left(2q_1+2q_2+2q_3\right) +\\
&+ \left.2m_3r_3r_4\sin\left(q_1+q_2+q_3\right) + \frac{m_3{r_3}^2\sin\left(2q_1+2q_2+2q_3\right)}{2}\right].{\dot{q}_4}^2
\end{aligned} \tag{3.21}$$

$$\begin{aligned}
g_1(q_1,q_2,q_3,q_4) &= \left[m_1r_1\sin\left(q_1\right) + 2m_2r_1\sin\left(q_1\right) + 2m_3r_1\sin\left(q_1\right) + m_2r_2\sin\left(q_1+q_2\right) + \right.\\
&+ 2m_3r_2\sin\left(q_1+q_2\right) + m_3r_3\sin\left(q_1+q_2+q_3\right).g\cos\left(q_4\right)
\end{aligned}$$

(3.22)

3.1.2 Equação de Torque da Junta 2

Na Equação 3.23 é retratada a equação canônica de torque da junta 2 do manipulador robótico.

$$\tau_2 = M_4\left(q_1,q_2,q_3,q_4\right)\ddot{q} + C_2\left(q_1,q_2,q_3,q_4,\dot{q}_1,\dot{q}_2,\dot{q}_3,\dot{q}_4\right)\dot{q} + g_2\left(q_1,q_2,q_3,q_4\right) \tag{3.23}$$

As Equações 3.24, 3.25 e 3.26 representam as parcelas de torque da junta 2, obtidas pela matriz de massa, matriz de termos centrífugos e de Coriolis, vetor gradiente da energia potencial, posições, velocidades e acelerações angulares dos manipuladores.

$$\begin{aligned} M_2(q_1,q_2,q_3,q_4,\ddot{q}_1,\ddot{q}_2,\ddot{q}_3,\ddot{q}_4) &= [2m_2r_1r_2\cos(q_2) + 4m_3r_1r_2\cos(q_2) + 2m_3r_1r_3\cos(q_2+q_3) + \\ &+ 4m_3r_2r_3\cos(q_3) + \left(m_2{r_2}^2 + m_3{r_3}^2 + 4m_3{r_2}^2\right].\ddot{q}_1 + \\ &+ \left[J_2 + m_2{r_2}^2 + 4m_3{r_2}^2 + m_3{r_3}^2 + 4m_3r_2r_3\cos(q_3)\right].\ddot{q}_2 + \\ &+ \left[2m_3r_2r_3\cos(q_3) + m_3{r_3}^2\right].\ddot{q}_3 \end{aligned} \tag{3.24}$$

$$\begin{aligned} C_2(q_1,q_2,q_3,q_4,\dot{q}_1,\dot{q}_2,\dot{q}_3,\dot{q}_4) &= [2m_2r_1r_2\sin(q_2) + 2m_3r_1r_3\sin(q_2+q_3) + 4m_3r_1r_2\sin(q_2)].{\dot{q}_1}^2 + \\ &+ [-4m_3r_2r_3\sin(q_3)].\dot{q}_1\dot{q}_3 + [-4m_3r_2r_3\sin(q_3)].\dot{q}_2\dot{q}_3 + \\ &+ [-2m_3r_2r_3\sin(q_3)].{\dot{q}_3}^2 + [2m_2r_2r_4\sin(q_1+q_2) + 4m_3r_2r_4\sin(q_1+q_2) + \\ &+ 2m_2r_1r_2\cos(q_1)\sin(q_1+q_2) + 4m_3r_1r_2\cos(q_1)\sin(q_1+q_2) + \\ &+ \frac{m_2{r_2}^2\sin(2q_1+2q_2)}{2} + 2m_3{r_2}^2\sin(2q_1+2q_2) + \\ &+ 2m_3r_2r_3\sin(2q_1+q_2+q_3) + 2m_3r_3r_4\sin(q_1+q_2+q_3) + \\ &+ 2m_3r_1r_3\cos(q_1)\sin(q_1+q_2+q_3) + \\ &+ \left.\frac{m_3{r_3}^2\sin(2q_1+2q_2+2q_3)}{2}\right].{\dot{q}_4}^2 \end{aligned} \tag{3.25}$$

$$\begin{aligned} g_2(q_1,q_2,q_3,q_4) &= [m_2r_2\sin(q_1+q_2) + 2m_3r_2\sin(q_1+q_2) + \\ &+ m_3r_3\sin(q_1+q_2+q_3)].g\cos(q_4) \end{aligned} \tag{3.26}$$

3.1.3 Equação de Torque da Junta 3

Na Equação 3.27 é mostrada a equação canônica de torque da junta 3 do manipulador robótico.

$$\tau_3 = M_3\left(q_1,q_2,q_3,q_4\right)\ddot{q} + C_3\left(q_1,q_2,q_3,q_4,\dot{q}_1,\dot{q}_2,\dot{q}_3,\dot{q}_4\right)\dot{q} + g_3\left(q_1,q_2,q_3,q_4\right) \tag{3.27}$$

As Equações 3.28, 3.29 e 3.30 caracterizam as parcelas de torque da junta 3, obtidas pela matriz de massa, matriz de termos centrífugos e de Coriolis, vetor gradiente da energia potencial, posições, velocidades e acelerações angulares dos manipuladores.

$$\begin{aligned} M_3(q_1,q_2,q_3,q_4,\ddot{q}_1,\ddot{q}_2,\ddot{q}_3,\ddot{q}_4) &= \left[2m_3r_1r_3cos\left(q_2+q_3\right)+2m_3r_2r_3cos\left(q_3\right)+m_3{r_3}^2\right].\ddot{q}_1 + \\ &+ \left[2m_3r_2r_3\cos\left(q_3\right)+m_3{r_3}^2\right].\ddot{q}_2 + \left[J_3+m_3{r_3}^2\right].\ddot{q}_3 \end{aligned} \tag{3.28}$$

$$\begin{aligned} C_3(q_1,q_2,q_3,q_4,\dot{q}_1,\dot{q}_2,\dot{q}_3,\dot{q}_4) &= \left[2m_3r_1r_3\sin\left(q_2+q_3\right)+2m_3r_2r_3\sin\left(q_3\right)\right].{\dot{q}_1}^2 + \left[4m_3r_2r_3\sin\left(q_3\right)\right].\dot{q}_1\dot{q}_2 + \\ &+ \left[2m_3r_2r_3\sin\left(q_3\right)\right].{\dot{q}_2}^2 + \left[2m_3r_3r_4\sin\left(q_1+q_2+q_3\right)+\right. \\ &+ 2m_3r_1r_3\sin\left(q_1+q_2+q_3\right)\cos\left(q_1\right)+ \\ &+ 2m_3r_2r_3\sin\left(q_1+q_2+q_3\right)\cos\left(q_1+q_2\right)+ \\ &+ \left.\frac{m_3{r_3}^2\sin\left(2q_1+2q_2+2q_3\right)}{2}\right].{\dot{q}_4}^2 \end{aligned} \tag{3.29}$$

$$g_3(q_1,q_2,q_3,q_4) = \left[m_3r_3\sin\left(q_1+q_2+q_3\right)\right].g\cos\left(q_4\right) \tag{3.30}$$

3.1.4 Equação de Torque da Junta 4

Na Equação 3.31 é exposta a equação canônica de torque da junta 4 do manipulador robótico.

$$\tau_4 = M_4\left(q_1,q_2,q_3,q_4\right)\ddot{q} + C_4\left(q_1,q_2,q_3,q_4,\dot{q}_1,\dot{q}_2,\dot{q}_3,\dot{q}_4\right)\dot{q} + g_4\left(q_1,q_2,q_3,q_4\right) \tag{3.31}$$

As Equações 3.32, 3.33 e 3.34 definem as parcelas de torque da junta 4, obtidas pela matriz de massa, matriz de termos centrífugos e de Coriolis, vetor gradiente da energia potencial, posições, velocidades e acelerações angulares dos manipuladores.

$$
\begin{aligned}
M_4(q_1,q_2,q_3,q_4,\ddot{q}_1,\ddot{q}_2,\ddot{q}_3,\ddot{q}_4) &= [2m_3r_1r_4\sin(q_1) + 2m_3r_2r_4\sin(q_1+q_2) + \\
&+ m_3r_3r_4\sin(q_1+q_2+q_3)]\sin(2q_4).\ddot{q}_1 + [2m_3r_2r_4\sin(q_1+q_2) + \\
&+ m_3r_3r_4\sin(q_1+q_2+q_3)]\sin(2q_4).\ddot{q}_2 + [m_3r_3r_4\sin(q_1+q_2+q_3)]\sin(2q_4).\ddot{q}_3 + \\
&+ \Big[J_4 + 4m_1{r_4}^2 + 4m_2{r_4}^2 + m_4{r_4}^2 + 4m_1r_1r_4\cos(q_1) + 8m_2r_1r_4\cos(q_1) + \\
&+ m_1{r_1}^2\cos(q_1)^2 + 4m_2{r_1}^2\cos(q_1)^2 + 4m_3{r_1}^2\cos(q_1)^2 + 4m_2r_2r_4\cos(q_1+q_2) + \\
&+ 4m_2r_1r_2\cos(q_1)\cos(q_1+q_2) + 8m_3r_1r_2\cos(q_1)\cos(q_1+q_2) + \\
&+ m_2{r_2}^2\cos(q_1+q_2)^2 + 4m_3{r_2}^2\cos(q_1+q_2)^2 + \\
&+ 4m_3r_1r_3\cos(q_1)\cos(q_1+q_2+q_3) + 4m_3r_2r_3\cos(q_1+q_2)\cos(q_1+q_2+q_3) + \\
&+ m_3{r_3}^2\cos(q_1+q_2+q_3)^2 + 4m_3r_1r_4\cos(q_1) + 4m_3r_1r_4\cos(q_1)\sin(q_4)^2\Big) + \\
&+ 4m_3r_2r_4\cos(q_1+q_2) + 4m_3r_2r_4\cos(q_1+q_2)\sin(q_4)^2 + \\
&+ 2m_3r_3r_4\cos(q_1+q_2+q_3) + 2m_3r_3r_4\cos(q_1+q_2+q_3)\sin(q_4)^2 + \\
&+ 4m_3{r_4}^2\sin(q_4)^2\Big].\ddot{q}_4
\end{aligned}
\tag{3.32}
$$

$$
\begin{aligned}
C_4(q_1,q_2,q_3,q_4,\dot{q}_1,\dot{q}_2,\dot{q}_3,\dot{q}_4) &= [2m_3r_1r_4\cos(q_1) + 2m_3r_2r_4\cos(q_1+q_2) + \\
&+ m_3r_3r_4\cos(q_1+q_2+q_3)]\sin(2q_4).\dot{q}_1{}^2 + \\
&+ \Big[2m_3r_2r_4\cos(q_1+q_2) + m_3r_3r_4\cos(q_1+q_2+q_3)]\sin(2q_4).\dot{q}_2{}^2 + \\
&+ [m_3r_3r_4\cos(q_1+q_2+q_3)]\sin(2q_4).\dot{q}_3{}^2 + [4m_3r_2r_4\cos(q_1+q_2) + \\
&+ 2m_3r_3r_4\cos(q_1+q_2+q_3)]\sin(2q_4).\dot{q}_1\dot{q}_2 + [2m_3r_3r_4\cos(q_1+q_2+q_3)]\sin(2q_4).\dot{q}_1\dot{q}_3 + \\
&+ [2m_3r_3r_4\cos(q_1+q_2+q_3)]\sin(2q_4).\dot{q}_2\dot{q}_3 + [-4m_1r_1r_4\sin(q_1) - 8m_2r_1r_4\sin(q_1) + \\
&- m_1{r_1}^2\sin(2q_1) - 4m_2{r_1}^2\sin(2q_1) - 4m_3{r_1}^2\sin(2q_1) - 4m_2r_1r_2\sin(2q_1+q_2) + \\
&- 8m_3r_1r_2\sin(2q_1+q_2) - 4m_3r_1r_3\sin(2q_1+q_2+q_3) - 4m_2r_2r_4\sin(q_1+q_2) \\
&- 4m_3{r_2}^2\sin(2q_1+2q_2) - 8m_3r_2r_4\sin(q_1+q_2)\sin(q_4)^2 - 8m_3r_1r_4\sin(q_1)\sin(q_4)^2 + \\
&- m_2{r_2}^2\sin(2q_1+2q_2) - 4m_3r_2r_3\sin(2q_1+2q_2+q_3) - m_3{r_3}^2\sin(2q_1+2q_2+2q_3) + \\
&- 4m_3r_3r_4\sin(q_1+q_2+q_3)\sin(q_4)^2\Big].\dot{q}_1\dot{q}_4 + [-4m_2r_2r_4\sin(q_1+q_2) - 4m_2r_1r_2\sin(q_1+q_2)\cos(q_1) + \\
&- 8m_3r_1r_2\sin(q_1+q_2)\cos(q_1) - m_2{r_2}^2\sin(2q_1+2q_2) - 4m_3{r_2}^2\sin(2q_1+2q_2) + \\
&- 4m_3r_2r_3\sin(2q_1+2q_2+2q_3) - 4m_3r_1r_3\cos(q_1)\sin(q_1+q_2+q_3) - m_3{r_3}^2\sin(2q_1+2q_2+2q_3) + \\
&- 4m_3r_3r_4\sin(q_1+q_2+q_3)\sin(q_4)^2 - 8m_3r_2r_4\sin(q_1+q_2)\sin(q_4)^2\Big].\dot{q}_2\dot{q}_4 + \\
&+ [-4m_3r_1r_3\cos(q_1)\sin(q_1+q_2+q_3) - 4m_3r_2r_3\cos(q_1+q_2)\sin(q_1+q_2+q_3) + \\
&- m_3{r_3}^2\sin(2q_1+2q_2+2q_3) - 4m_3r_3r_4\sin(q_1+q_2+q_3)\sin(q_4)^2\Big].\dot{q}_3\dot{q}_4 + \Big[2m_3{r_4}^2 + \\
&+ 2m_3r_1r_4\cos(q_1) + 2m_3r_2r_4\cos(q_1+q_2) + m_3r_3r_4\cos(q_1+q_2+q_3)]\sin(2q_4).\dot{q}_4{}^2
\end{aligned}
\tag{3.33}
$$

$$
\begin{aligned}
g_4(q_1,q_2,q_3,q_4) &= [2m_1r_4 + 2m_2r_4 + 2m_3r_4 + m_4r_4 + m_1r_1\cos(q_1) + 2m_2r_1\cos(q_1) + \\
&+ 2m_3r_1\cos(q_1) + m_2r_2\cos(q_1+q_2) + 2m_3r_2\cos(q_1+q_2) + \\
&+ m_3r_3\cos(q_1+q_2+q_3)].g\sin(q_4)
\end{aligned}
\tag{3.34}
$$

3.2 Considerações Finais

A obtenção deste modelo foi de grande importância para o desenvolvimento deste trabalho, pois permitiu estimar os torques de carga de cada uma das 4 juntas dos manipuladores para qualquer configuração desejada. O modelo foi utilizado para a obtenção do perfil de carga para as quatro juntas e 8 trajetórias medidas.

O modelo dinâmico de Euler Lagrange, como o obtido neste trabalho, representado na forma canônica (Equação 3.5), pode ser utilizado ainda em estruturas de controle de torque computado, para estabelecimento de impedância mecânica equivalente, no qual sistemas de cooperação homem-robô são modelados por uma associação massa-mola-amortecedor equivalente, com o objetivo de melhoria da sensação de contato nesta cooperação, como realizado em Silva (2014).

Utilizando o modelo desenvolvido, pode-se ainda, de forma inversa ao que foi realizado neste estudo, obter por meio de simulações computacionais informações de como o manipulador real se comportaria para um dado conjunto de torques nas juntas. Para isso, seria necessário ter conhecimento dos parâmetros mecânicos dos manipuladores como: dimensões, massas, momentos de inércia de cada um dos elos dos manipuladores.

Capítulo 4

Determinação das trajetórias dos manipuladores robóticos

"One, remember to look up at the stars and not down at your feet. Two, never give up work. Work gives you meaning and purpose and life is empty without it. Three, if you are lucky enough to find love, remember it is there and don't throw it away."

Stephen Hawking

---

[a]Um, lembre-se de olhar para as estrelas e não para baixo, para seus pés. Dois, nunca desista do trabalho. Trabalho dá significado e propósito, e a vida está vazia sem ele. Três, se você tiver sorte o suficiente para encontrar o amor, não o deixe ir embora.

Este trabalho tem como objetivo o projeto e posterior construção de manipuladores robóticos de membros superiores, tal projeto permite aos usuários dos manipuladores controle sobre a trajetória, os quais podem, dentro das limitações de segurança e de próprias limitações construtivas (GDL) dos manipuladores, movimentá-los como desejar. Mas, para especificar os elementos de potência dos mesmos, é necessário realizar o estudo para a obtenção de diversas trajetórias possíveis, alimentando o modelo dinâmico desenvolvido, e assim, por meio dos métodos descritos no Capítulo

5, especificar os elementos de potência dos manipuladores.

Para este levantamento de trajetórias, foram utilizadas algumas unidades de um sistema chamado WDSS (*Wireless Dynamics Sensor System*) da empresa *Vernier*. A Figura 4.1 mostra a foto deste equipamento.

Figura 4.1: Sistema para medição de acelerações lineares em três eixos.

Este sistema é dotado de um acelerômetro de 3 eixos, sendo possível, com a utilização deste e de equações matemáticas descritas na nota de aplicação AN1057, que foi desenvolvida por Fisher (2010), determinar uma inclinação. A medição de inclinação por meio de um acelerômetro triaxial é feita pela mensuração da aceleração da gravidade e a projeção desta nos 3 eixos, parâmetros estes que permitem obter a inclinação do acelerômetro e, consequentemente, do objeto ao qual está afixado, utilizando trigonometria.

Neste trabalho, para o cálculo das posições angulares desejadas, foi adotado o sistema de coordenadas *North, East, Down* (NED), como apresentado na Figura 4.2. Por meio das equações 4.1 e 4.2 e das projeções da aceleração da gravidade A_x e A_y medidas pelo acelerômetro, são calculadas as inclinações de rolamento e arfagem, respectivamente.

$$\phi = sin^{-1}\left(\frac{A_y}{1g}\right) \tag{4.1}$$

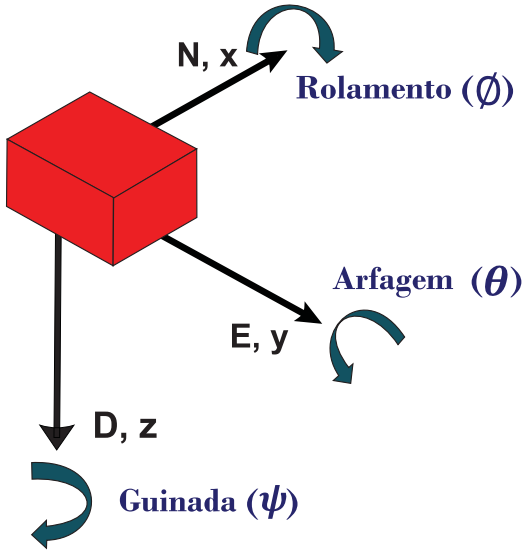


Figura 4.2: Sistema de Coordenadas NED.
Fonte: (Reis, 2014).

$$\theta = sin^{-1}\left(\frac{A_x}{1g}\right) \tag{4.2}$$

onde:

A_x é a projeção da aceleração da gravidade medida pelo acelerômetro no eixo x;

A_x é a projeção da aceleração da gravidade medida pelo acelerômetro no eixo y.

Conforme consta no manual do fabricante, os módulos WDSS são calibrados na fábrica e normalmente não precisam de um novo ajuste nesta. Entretanto, no mesmo manual, o fabricante explica uma maneira bem simples de realizar tal tarefa. Como sugerido pelo fabricante, foi realizado um teste com os módulos sobre uma superfície plana e foi possível perceber uma diferença pequena, mas considerável, entre os resultados apresentados pelos módulos e os resultados esperados.

Desta forma, realizou-se uma nova calibração dos módulos e, para este procedimento, mais de um método foi encontrado em notas de aplicação de fabricantes de acelerômetros de 3 eixos, do mais simples ao mais elaborado.

Neste trabalho, optou-se por utilizar o método descrito na nota de apli-

cação AN3182, desenvolvida por *STMicroelectronics* (2010), pois este pareceu ser o que apresentaria o melhor resultado além de não ser tecnicamente complicado de ser executado; tal método nada mais é do que o Método dos Mínimos Quadrados.

Para a calibração, os módulos foram colocados em 6 posições estacionárias, apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Posições utilizadas para calibração dos módulos WDSS.

Posição Estacionária	**Acelerações desejadas**		
	$A_x[g]$	$A_y[g]$	$A_z[g]$
Face X+ para baixo	+ 1	0	0
Face X- para baixo	- 1	0	0
Face Y+ para baixo	0	+ 1	0
Face Y- para baixo	0	- 1	0
Face Z+ para baixo	0	0	+ 1
Face Z- para baixo	0	0	- 1

A relação entre os dados não processados obtidos por meio dos módulos e os parâmetros de calibração, resultando nos dados já calibrados e normalizados, é realizada empregando-se a equação 4.3.

$$\begin{bmatrix} A_{x1} & A_{y1} & A_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x & A_y & A_z & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} ACC_{11} & ACC_{21} & ACC_{31} \\ ACC_{12} & ACC_{22} & ACC_{32} \\ ACC_{13} & ACC_{23} & ACC_{33} \\ ACC_{10} & ACC_{20} & ACC_{30} \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

Ou, de forma reduzida, como apresentado na equação 4.4.

$$Y = W.X \tag{4.4}$$

Onde:

- A matriz Y é o vetor gravidade da Terra normalizado conhecido;
- A matriz W são os dados não processados coletados nas 6 posições estacionárias;
- A matriz X são os 12 parâmetros de calibração que precisam ser determinados.

Os parâmetros de calibração são calculados como mostra a equação 4.5.

$$X = \left[W^T.W\right]^{-1}.W^T.Y \tag{4.5}$$

Os dados não processados, dos dois módulos WDSS, Kaptiza e Rabtiza, que compõem a matriz W, são apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4.2: Dados não processados de aceleração para o módulo WDSS Kaptiza.

$A_x[m/s^2]$	$A_y[m/s^2]$	$A_z[m/s^2]$	Constante
-9,2916	0,2070	0,2552	1,0000
10,2304	0,0347	0,5039	1,0000
0,6561	-9,7771	0,4604	1,0000
0,4637	9,8396	0,1372	1,0000
0,5407	0,3640	-9,3375	1,0000
0,4592	0,0393	10,3094	1,0000

Tabela 4.3: Dados não processados de aceleração para o módulo WDSS Rabtiza.

$A_x[m/s^2]$	$A_y[m/s^2]$	$A_z[m/s^2]$	Constante
-9,4023	0,1486	0,3253	1,0000
10,1311	-0,0188	0,5607	1,0000
0,5664	-9,7451	0,5221	1,0000
0,3244	9,8063	0,4154	1,0000
0,5359	-0,3894	-9,1889	1,0000
0,4383	0,0959	10,3422	1,0000

Realizando o procedimento descrito acima, os dois módulos WDSS, Kaptiza e Rabtiza, foram calibrados e as matrizes com os parâmetros de calibração obtidos são apresentados nas equações 4.6 e 4.7 abaixo. Os dados pós calibração são apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.5.

$$X_{Kaptiza} = \begin{bmatrix} 0{,}1024 & 0{,}0009 & -0{,}0013 \\ 0{,}0010 & 0{,}1020 & 0{,}0016 \\ 0{,}0004 & 0{,}0017 & 0{,}1018 \\ -0{,}0525 & -0{,}0131 & -0{,}0391 \end{bmatrix} \tag{4.6}$$

$$X_{Rabtiza} = \begin{bmatrix} 0{,}1024 & 0{,}0009 & -0{,}0012 \\ 0{,}0013 & 0{,}1023 & 0{,}0006 \\ 0{,}0005 & -0{,}0025 & 0{,}1024 \\ -0{,}0525 & 0{,}0026 & -0{,}0502 \end{bmatrix} \tag{4.7}$$

Tabela 4.4: Dados pós-calibração para o módulo WDSS Kaptiza para as 6 posições medidas.

Posição Estacionária	**Acelerações pós-calibração**		
	$A_x[g]$	$A_y[g]$	$A_z[g]$
Face X+ para baixo	-1,0041	0,0002	-0,0009
Face X- para baixo	0,9958	0,0003	-0,0008
Face Y+ para baixo	0,0050	-1,0088	-0,0091
Face Y- para baixo	0,0051	0,9909	-0,0095
Face Z+ para baixo	-0,0009	0,0089	-0,9897
Face Z- para baixo	-0,0008	0,0085	-1,0099

Tabela 4.5: Dados pós-calibração para o módulo WDSS Rabtiza para as 6 posições medidas.

Posição Estacionária	**Acelerações pós-calibração**		
	$A_x[g]$	$A_y[g]$	$A_z[g]$
Face X+ para baixo	-1,0068	0,0083	-0,0052
Face X- para baixo	0,9930	0,0086	-0,0054
Face Y+ para baixo	0,0013	-0,9948	-0,0030
Face Y- para baixo	0,0015	1,0047	-0,0026
Face Z+ para baixo	-0,0056	-0,0136	-0,9918
Face Z- para baixo	0,0054	-0,0132	1,0080

Com as matrizes de calibração dos módulos WDSS obtidas, foram realizadas 8 medições de trajetórias, com 2 indivíduos, sendo as 4 primeiras com o indivíduo 1 e as outras 4 com o indivíduo 2. Foi solicitado aos indivíduos que fizessem dentro de um intervalo pré-determinado de tempo, a tarefa de erguer e baixar uma carga que foi colocada à disposição dos mesmos, com a dinâmica e forma que considerassem melhor. Os indivíduos foram instruídos para que os movimentos realizados pelos mesmos respeitassem as limitações relativas aos GDL do manipulador robótico proposto. O número de medições não foi elevado, pois, durante o decorrer das medições,

percebeu-se que os movimentos realizados pelos indivíduos não eram muito diferentes entre si e credita-se parte disto ao número relativamente pequeno de GDL do manipulador proposto, o que, a princípio, impossibilitaria uma grande variabilidade de formas de realizar tais movimentos.

Nas Figuras 4.3a e 4.3b são mostradas fotos dos indivíduos durante as medições, enquanto que na Tabela 4.6 são apresentadas algumas informações que caracterizam melhor o perfil dos indivíduos que participaram das medições.

(a) Indivíduo 1 realizando a trajetória. (b) Indivíduo 2 realizando a trajetória.

Figura 4.3: Indivíduos 1 e 2 realizando suas trajetórias.

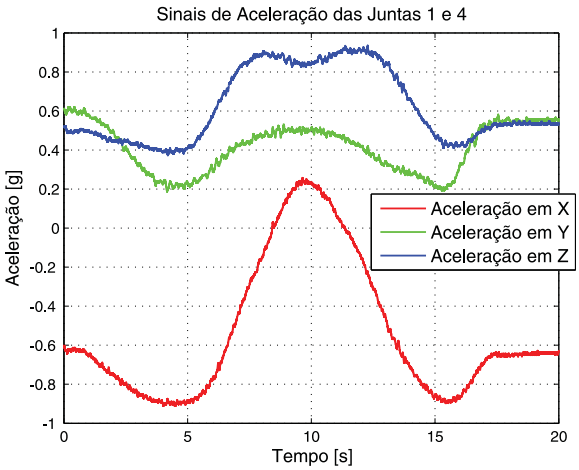
Tabela 4.6: Perfil dos indivíduos que participaram das medições de trajetória.

Indivíduos	**Idade (anos)**	**Massa (Kg)**	**Altura (m)**	**Sexo**
Indivíduo 1	26	83	1,85	Masculino
Indivíduo 2	26	75	1,92	Masculino

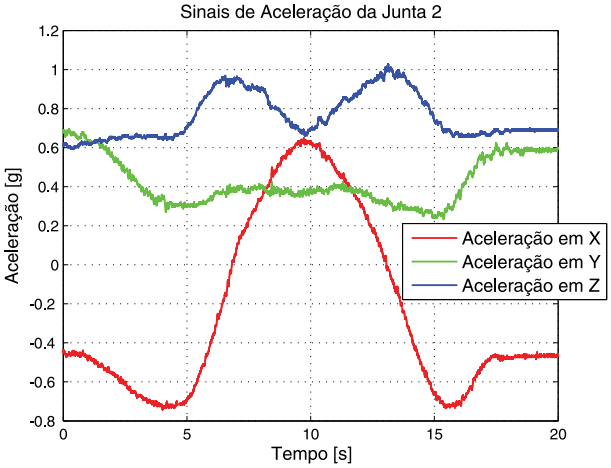
O tempo de cada uma das medições foi de 20 segundos e estas foram realizadas a uma taxa de amostragem de 1 kHz. Para as medições seria necessária a utilização simultânea de 3 módulos, mas, como só haviam disponíveis 2 módulos, foram utilizadas 2 unidades do sistema WDSS e foi necessário que os indivíduos realizassem o movimento duas vezes, tentando na segunda vez ser o mais fiel possível com o movimento que havia sido realizado na primeira. Na primeira, eram coletados os dados referentes às juntas 1, 2 e 4 (Ombro e cotovelo) e, na segunda, relativos à junta 3 (mão).

Com estes dados foi possível determinar as posições angulares dos 4 GDL de cada um dos manipuladores.

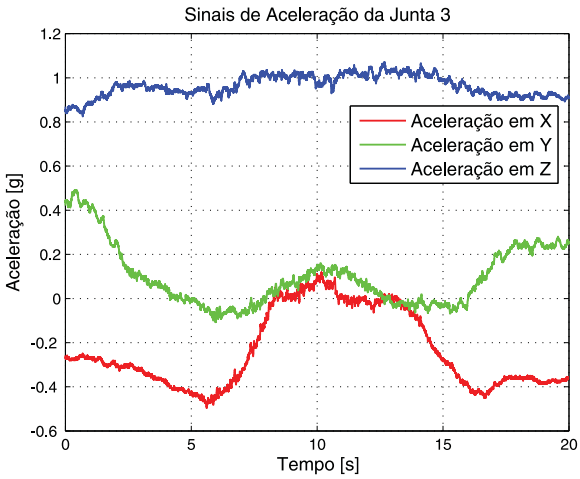
Nas Figuras 4.4a, 4.4b e 4.4c, são apresentadas as acelerações obtidas por meio das unidades WDSS, para uma medição, sem nenhum tipo de tratamento.



(a) Acelerações obtidas por meio da unidade WDSS fixada ao braço do indivíduo.



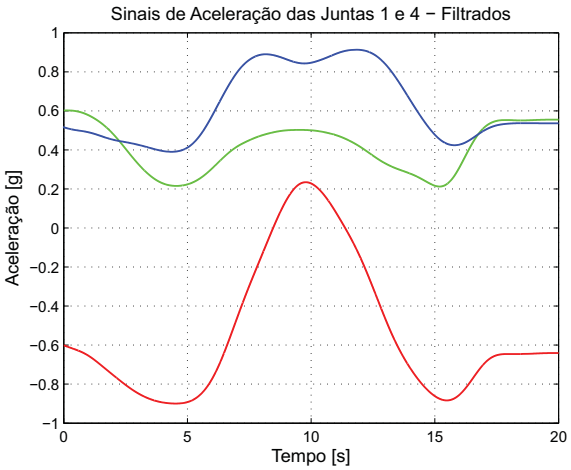
(b) Acelerações obtidas por meio da unidade WDSS fixada ao antebraço do indivíduo.



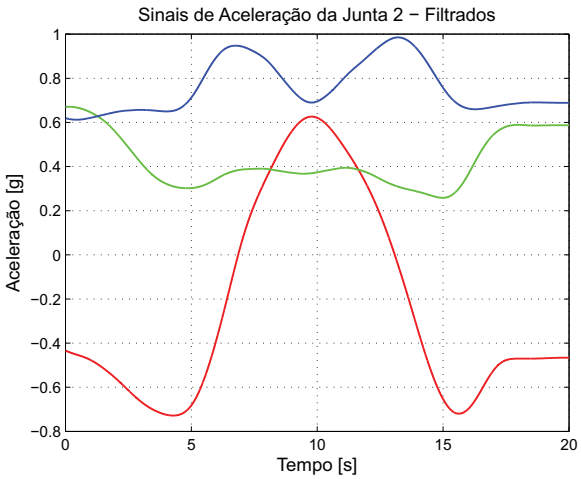
(c) Acelerações obtidas por meio da unidade WDSS fixada à mão do indivíduo.

Figura 4.4: Acelerações obtidas por meio da unidade WDSS.

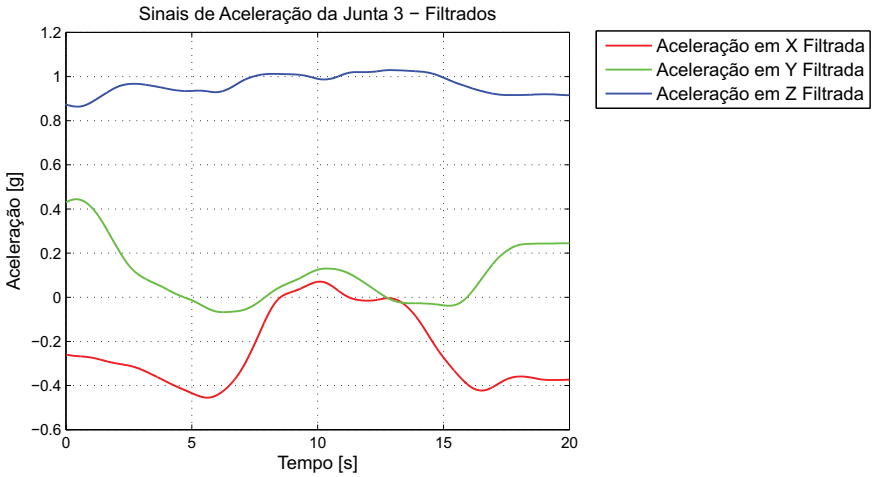
Percebe-se pelos gráficos apresentados que os sinais obtidos possuem um sinal de alta frequência sobreposto ao sinal de interesse, e isto se deve a características do sensor utilizado. Estes sinais foram então filtrados por meio de um filtro digital *Butterworth* de 2ª ordem para suavizar os sinais obtidos. Os resultados são apresentados nas Figuras 4.5a, 4.5b e 4.5c.



(a) Acelerações obtidas por meio da unidade WDSS fixada ao braço do indivíduo, filtradas.



(b) Acelerações obtidas por meio da unidade WDSS fixada ao antebraço do indivíduo, filtradas.



(c) Acelerações obtidas por meio da unidade WDSS fixada à mão do indivíduo, filtradas.

Figura 4.5: Acelerações obtidas por meio da unidade WDSS, após filtragem.

Utilizando os sinais de aceleração filtrados e as equações 4.1 e 4.2, foram calculadas as inclinações das juntas do manipulador robótico no sistema de coordenadas NED, como apresentado na Figura 4.6.

Posteriormente, foi necessário realizar uma mudança nas referências, para que estas ficassem de acordo com o adotado no modelo dinâmico desenvolvido, transformando assim as inclinações das juntas em relação ao solo em posições angulares de cada uma das juntas. Isto foi realizado utilizando as equações 4.8-4.11.

$$q_1 = \theta_1 + 90^\circ \tag{4.8}$$

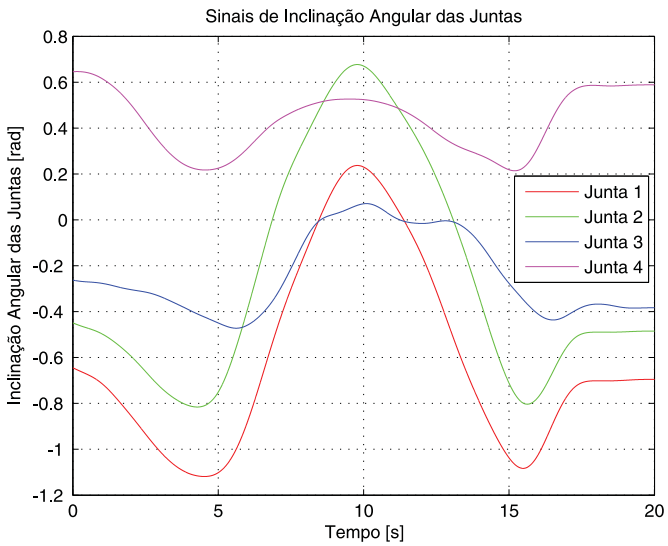


Figura 4.6: Inclinações das juntas do manipulador robótico.

$$q_2 = \theta_2 - q_1 + 90^\circ \tag{4.9}$$

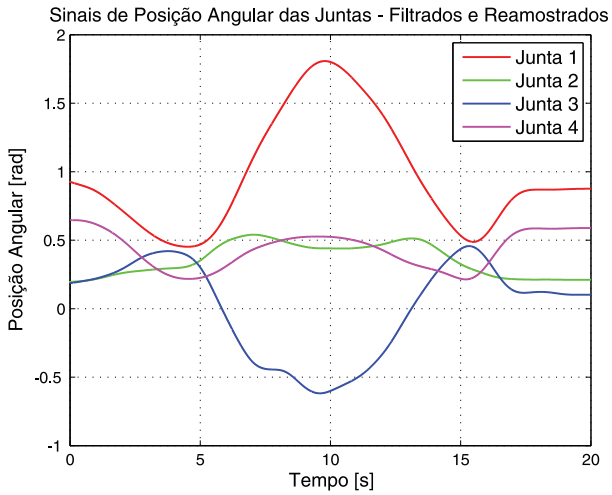
$$q_3 = \theta_3 - q_1 - q_2 + 90^\circ \tag{4.10}$$

$$q_4 = \phi_4 \tag{4.11}$$

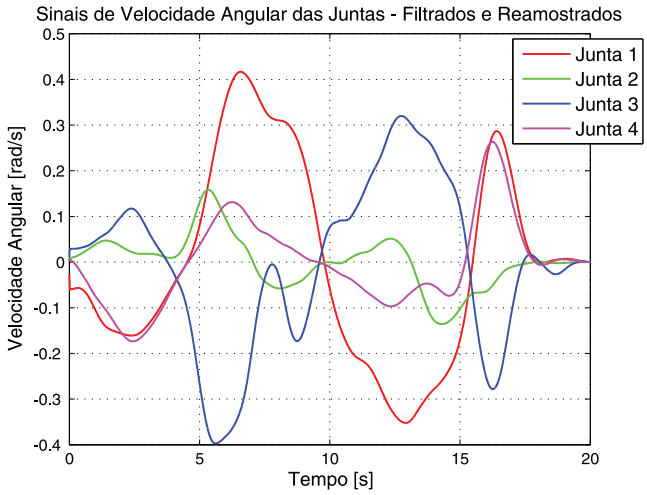
Como havia sido explanado anteriormente, foram também realizadas diferenciações numéricas dos dados anteriores para a obtenção dos sinais de velocidade e aceleração angulares das juntas. Desta forma, os dados finais obtidos para as 8 medições realizadas, utilizados como entrada no modelo dinâmico do manipulador robótico, obtido pela *Formulação de Lagrange*, são apresentados nas Figuras 4.7 - 4.14.

Posteriormente, com o objetivo de avaliar a dinâmica de braços humanos, foi realizada uma análise espectral para cada um dos sinais de velocidade angular obtidos, referentes aos quatro GDL que os manipuladores possuem. Na Tabela 4.7 são apresentados os valores de banda passante que foram obtidos para os referidos sinais.

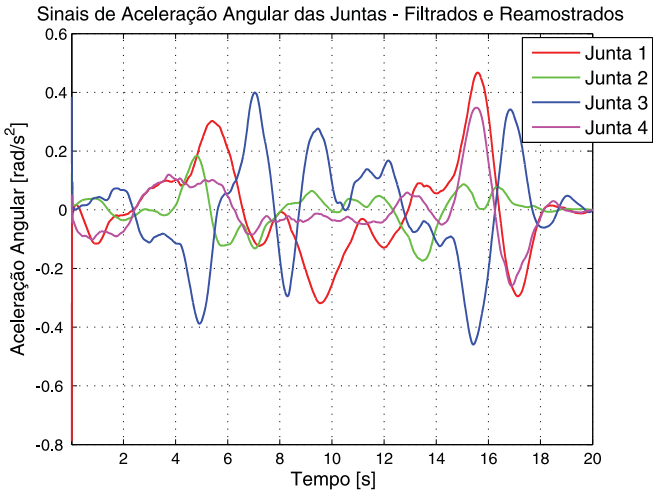
Ao analisar os dados apresentados na Tabela 4.7, constatou-se que os



(a) Posições das juntas do manipulador robótico.

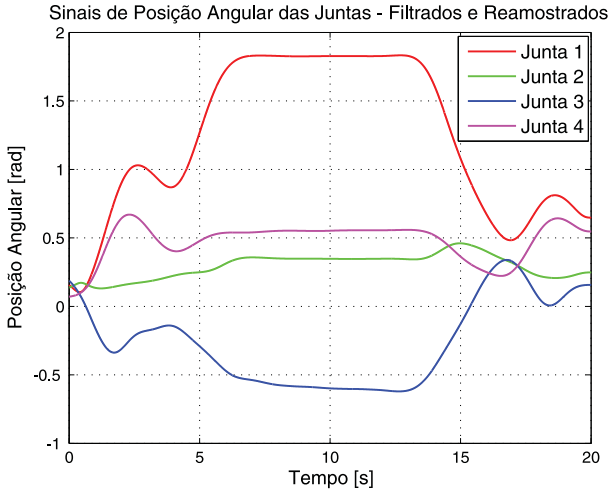


(b) Velocidades das juntas do manipulador robótico.

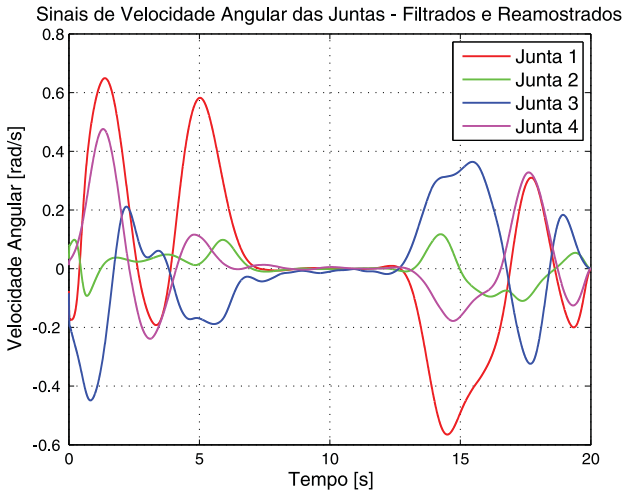


(c) Acelerações das juntas do manipulador robótico.

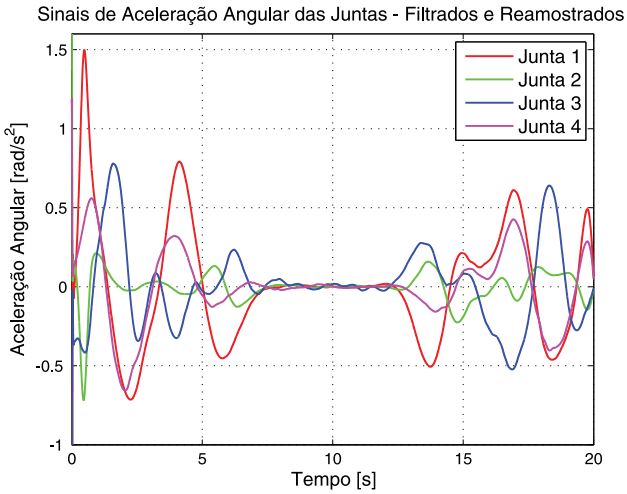
Figura 4.7: Posições, velocidades e acelerações das juntas do manipulador robótico - Trajetória 1.



(a) Posições das juntas do manipulador robótico.

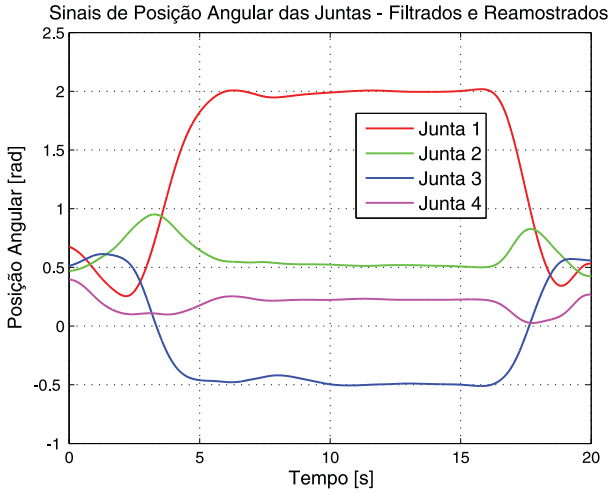


(b) Velocidades das juntas do manipulador robótico.

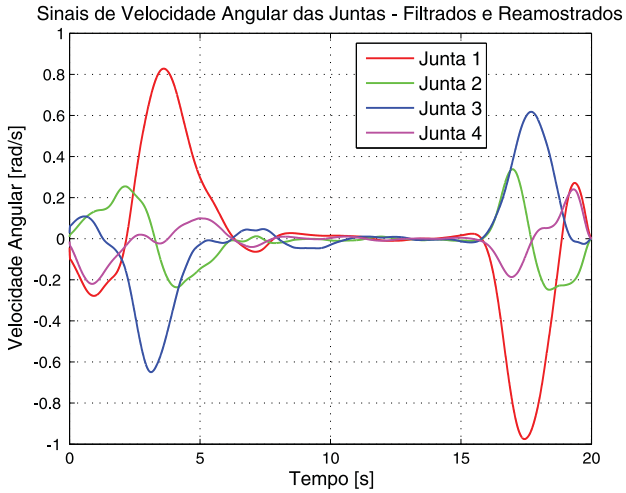


(c) Acelerações das juntas do manipulador robótico.

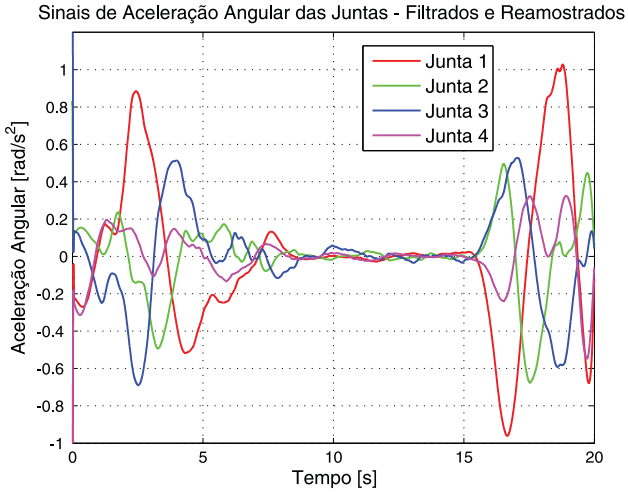
Figura 4.8: Posições, velocidades e acelerações das juntas do manipulador robótico - Trajetória 2.



(a) Posições das juntas do manipulador robótico.

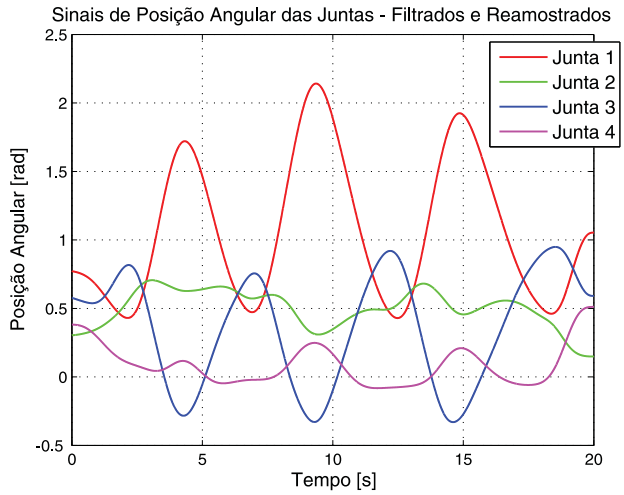


(b) Velocidades das juntas do manipulador robótico.

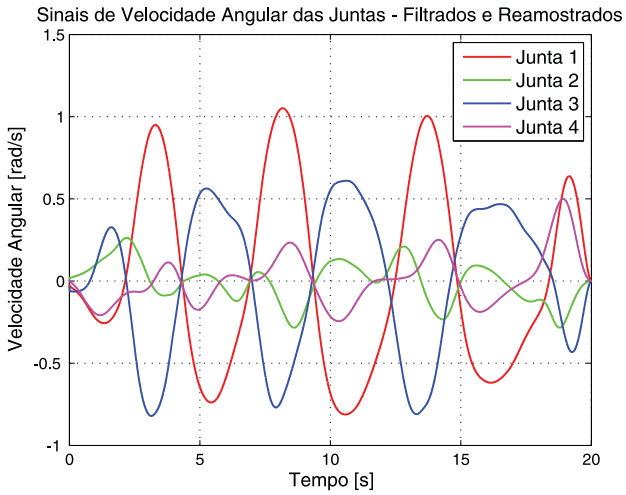


(c) Acelerações das juntas do manipulador robótico.

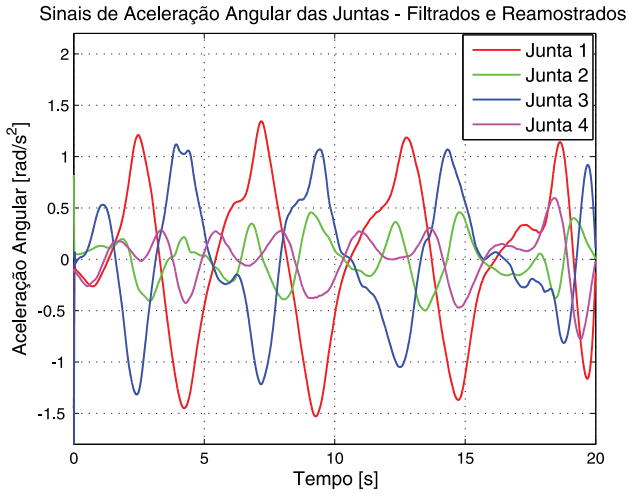
Figura 4.9: Posições, velocidades e acelerações das juntas do manipulador robótico - Trajetória 3.



(a) Posições das juntas do manipulador robótico.

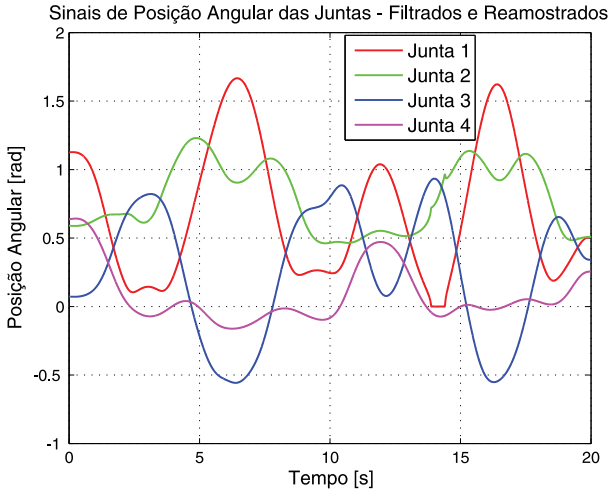


(b) Velocidades das juntas do manipulador robótico.

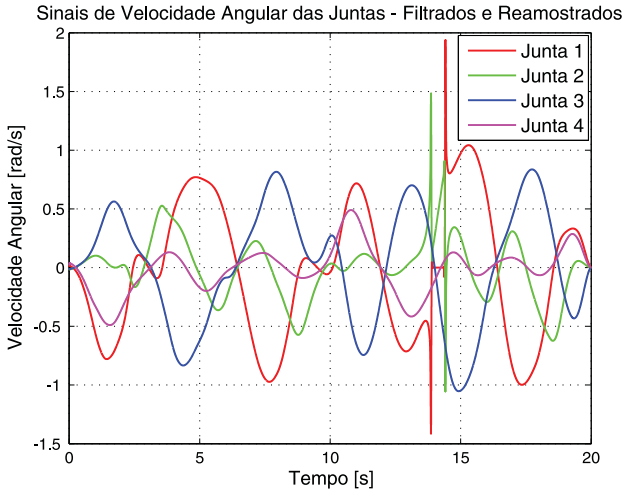


(c) Acelerações das juntas do manipulador robótico.

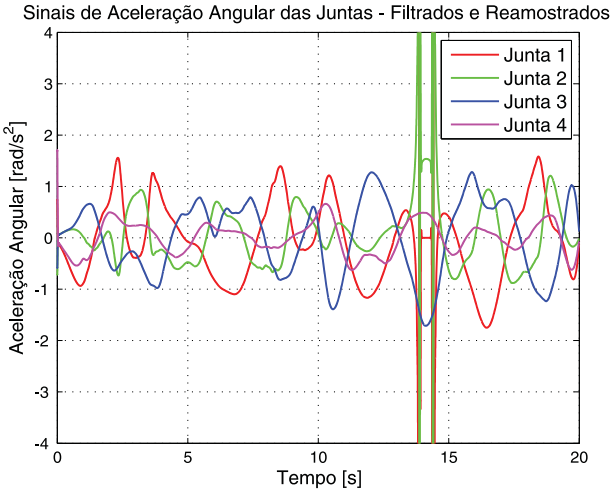
Figura 4.10: Posições, velocidades e acelerações das juntas do manipulador robótico - Trajetória 4.



(a) Posições das juntas do manipulador robótico.

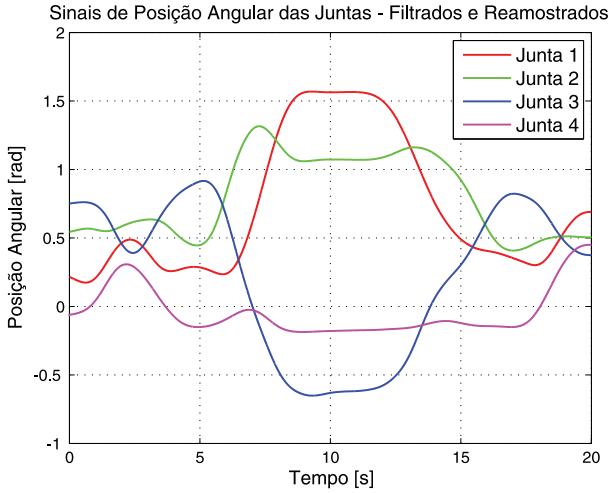


(b) Velocidades das juntas do manipulador robótico.

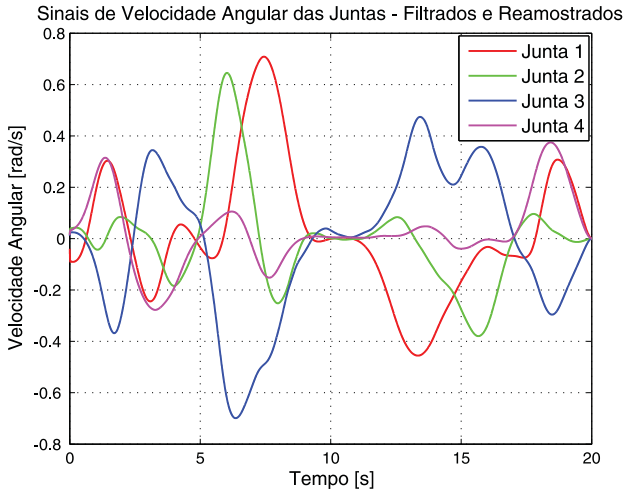


(c) Acelerações das juntas do manipulador robótico.

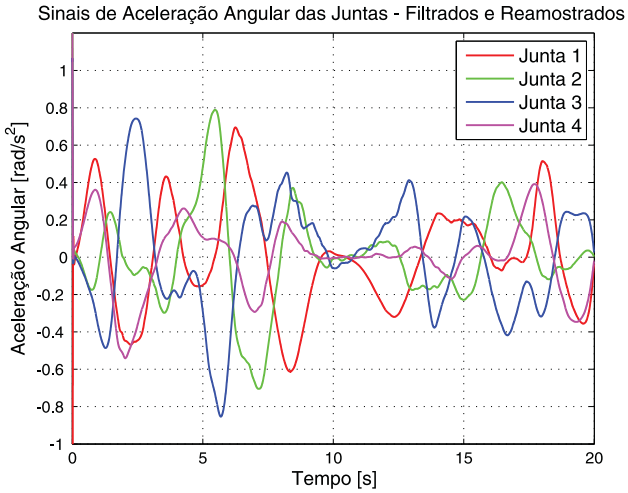
Figura 4.11: Posições, velocidades e acelerações das juntas do manipulador robótico - Trajetória 5.



(a) Posições das juntas do manipulador robótico.

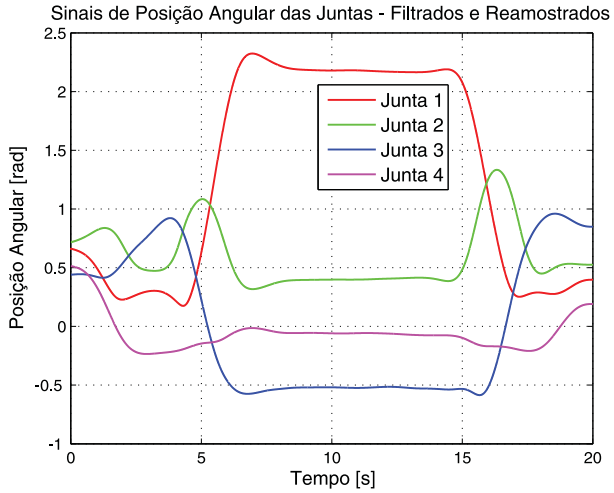


(b) Velocidades das juntas do manipulador robótico.

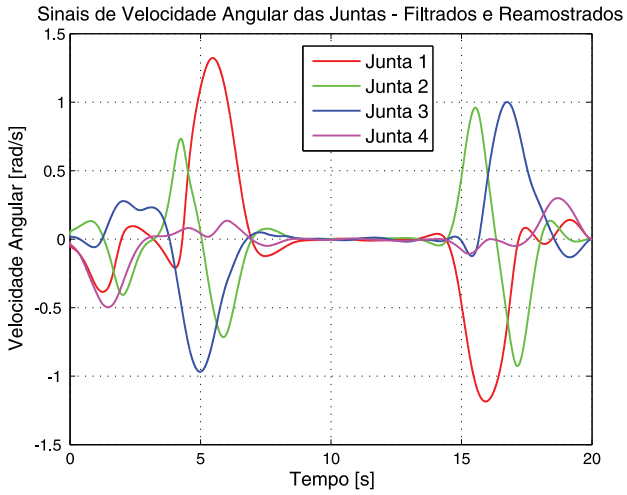


(c) Acelerações das juntas do manipulador robótico.

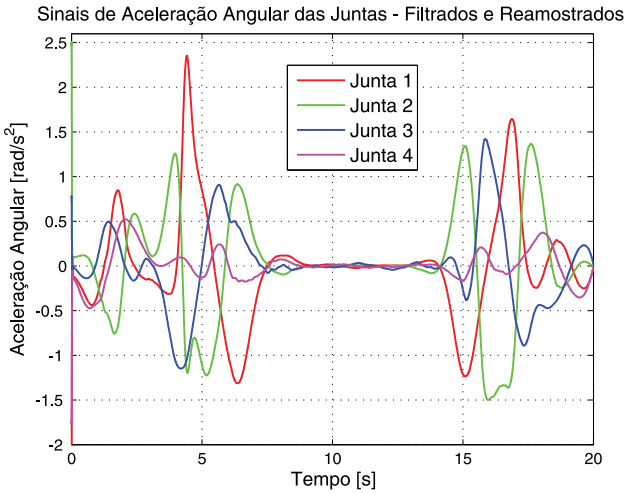
Figura 4.12: Posições, velocidades e acelerações das juntas do manipulador robótico - Trajetória 6.



(a) Posições das juntas do manipulador robótico.

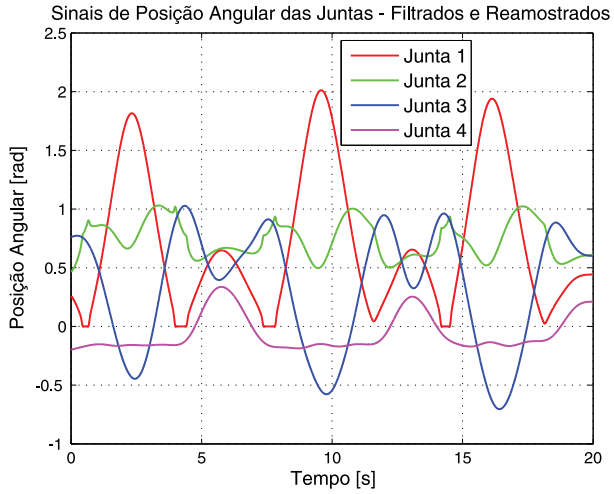


(b) Velocidades das juntas do manipulador robótico.

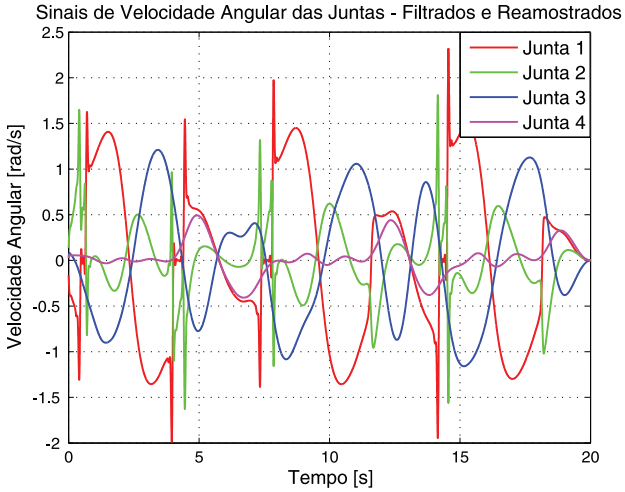


(c) Acelerações das juntas do manipulador robótico.

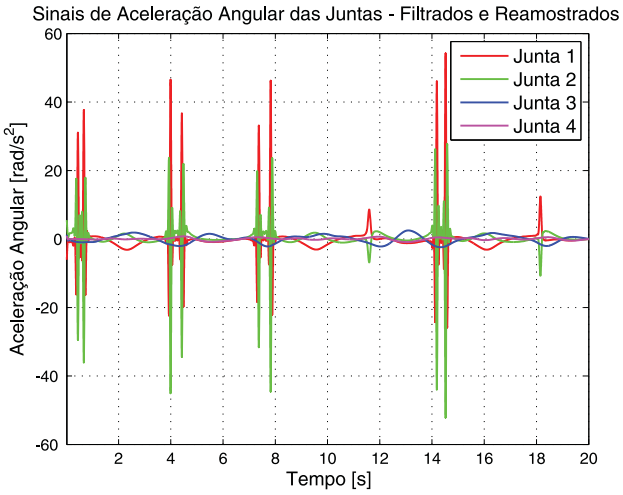
Figura 4.13: Posições, velocidades e acelerações das juntas do manipulador robótico - Trajetória 7.



(a) Posições das juntas do manipulador robótico.



(b) Velocidades das juntas do manipulador robótico.



(c) Acelerações das juntas do manipulador robótico.

Figura 4.14: Posições, velocidades e acelerações das juntas do manipulador robótico - Trajetória 8.

Tabela 4.7: Frequências referentes à dinâmica do movimento das juntas do braço humano.

Junta/Trajetória	**Frequências (Hz)**							
	T1	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**
J1	0,40	0,55	0,45	0,45	0,60	0,45	0,70	0,85
J2	0,70	1,40	0,70	0,70	1,00	0,75	0,80	1,15
J3	0,55	0,65	0,50	0,60	0,60	0,55	0,55	0,65
J4	0,50	0,55	0,65	0,65	0,70	0,60	0,70	0,75

braços humanos possuem dinâmica relativamente baixa, sendo um fator complicador para a especificação dos elementos de potência dos manipuladores robóticos, tal como será discutido nos próximos capítulos.

Por fim, utilizando a *Formulação de Lagrange*, as trajetórias descritas neste capítulo e considerando que os mesmos operam com a carga de 60Kg durante a trajetória desenvolvida, são obtidos os torques necessários em cada uma das juntas dos manipuladores robóticos para que os mesmos desenvolvam tais trajetórias. Nas Figuras 4.15 - 4.18 são apresentados os conjugados para as 4 juntas dos manipuladores robóticos para uma das trajetórias simuladas.

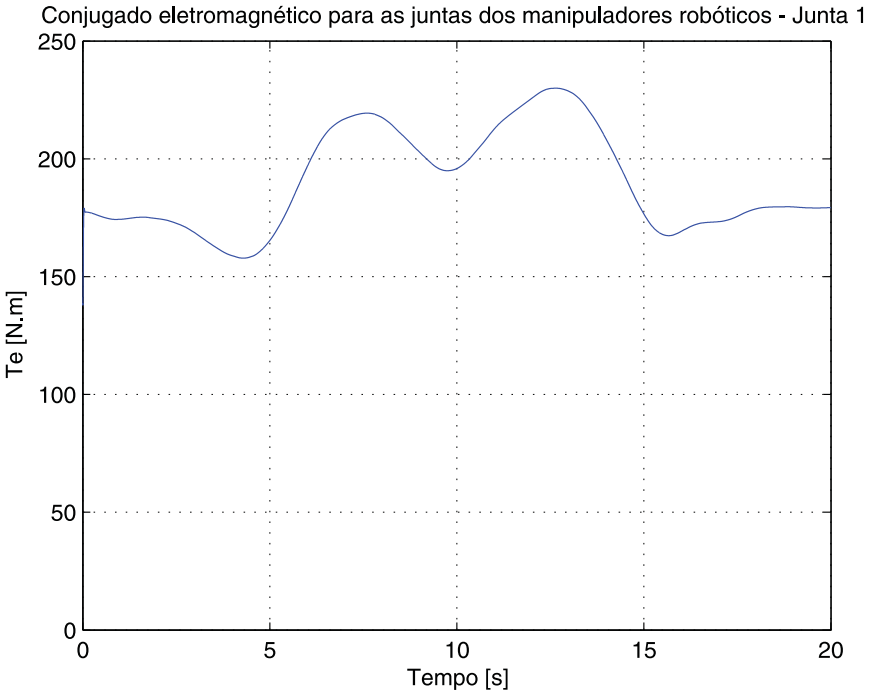


Figura 4.15: Conjugado para as juntas dos manipuladores robóticos - Junta 1.

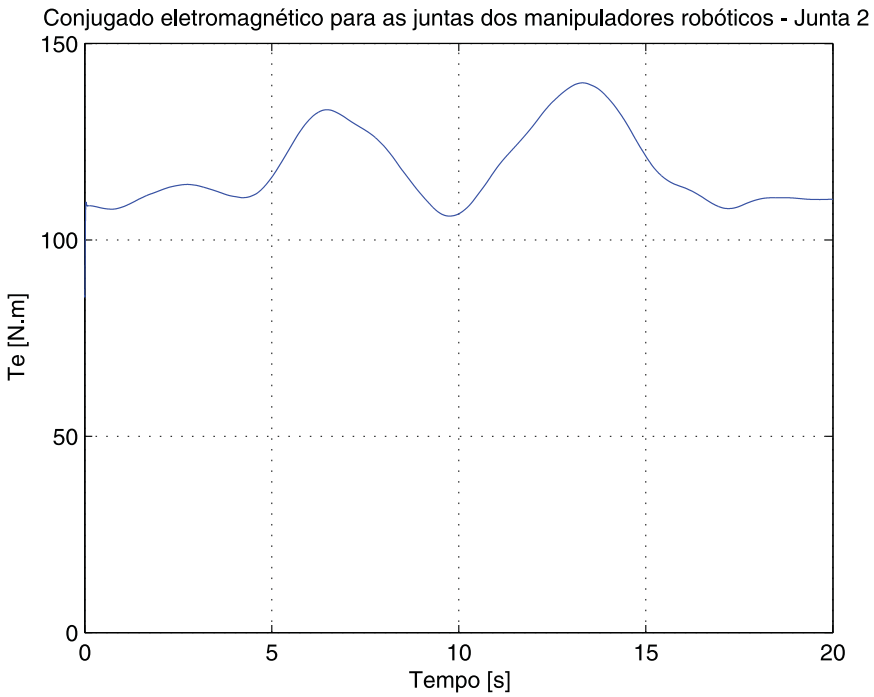


Figura 4.16: Conjugado para as juntas dos manipuladores robóticos - Junta 2.

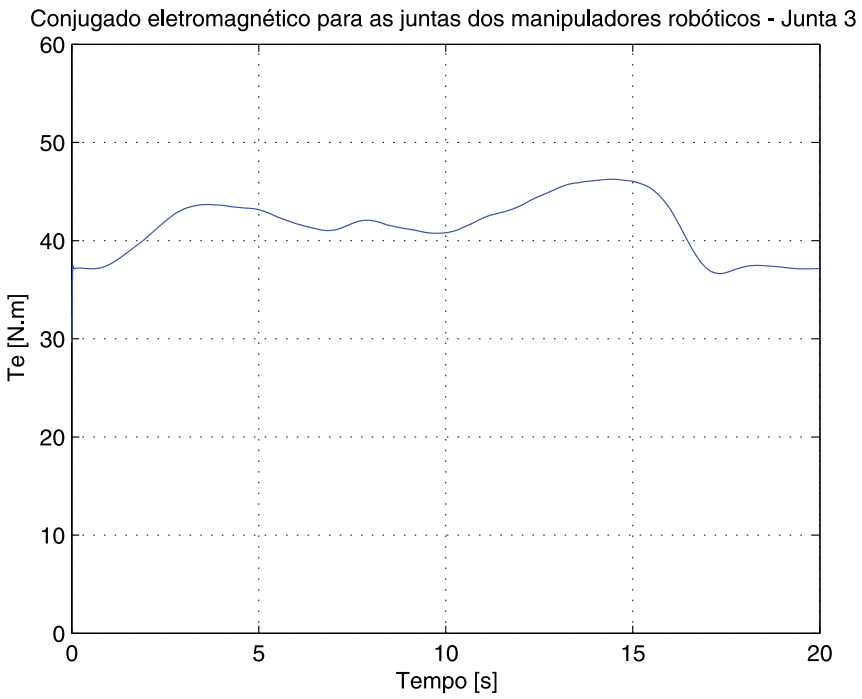


Figura 4.17: Conjugado para as juntas dos manipuladores robóticos - Junta 3.

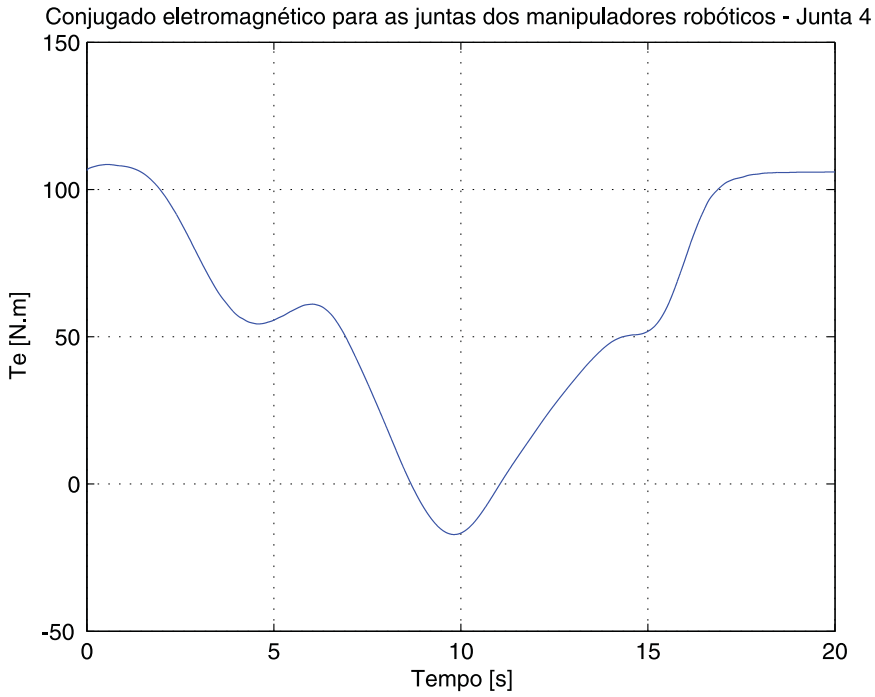


Figura 4.18: Conjugado para as juntas dos manipuladores robóticos - Junta 4.

4.1 Considerações Finais

O presente Capítulo apresentou a técnica utilizada para realizar a determinação de possíveis trajetórias para os manipuladores robóticos, utilizando para tal sistemas baseados em acelerômetros triaxiais, os quais foram de fácil utilização e com os quais foi possível obter resultados satisfatórios e que permitiram a continuidade do trabalho. Os sinais obtidos possuem um sinal de alta frequência sobreposto ao sinal de interesse, que se deve a características do sensor utilizado, entretanto isto foi resolvido com relativa facilidade, utilizando filtros digitais.

Com os dados adquiridos foi possível alimentar o modelo dinâmico dos manipuladores robóticos, o qual nos retornou os torques em cada uma das juntas destes para as trajetórias desenvolvidas, dados essenciais para o processo de especificação que foi desenvolvido e que é exposto adiante. Além disso, permitiu também quantificar quão lenta era a dinâmica dos braços humanos, que foi um grande complicador para o processo de especificação dos elementos de potência.

Capítulo 5

Especificação dos elementos de potência dos manipuladores robóticos

"The greater our knowledge increases the more our ignorance unfolds."

John F. Kennedy

---

[a]Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância.

Este capítulo apresenta a especificação dos elementos de potência dos manipuladores robóticos desenvolvidos. Este processo de especificação foi dividido e é apresentado nas seguintes seções:

- Determinação das razões de transmissão;
- Estimação dos parâmetros dos circuitos elétricos equivalentes das máquinas de indução propostas;
- Avaliação do máximo conjugado disponibilizado pelas máquinas frente ao máximo nível de conjugado demandado na aplicação;
- Avaliação da região de linearidade entre corrente de estator e conjugado para cada uma das máquinas candidatas à aplicação;

- Controle vetorial com orientação indireta de campo pelo fluxo de rotor;
- Avaliação da temperatura alcançada pelas máquinas elegíveis;
- Avaliação da energia consumida pelas máquinas candidatas em uma repetição das trajetórias utilizadas;
- Síntese dos resultados;
- Especificação dos conversores de frequência.

5.1 Determinação das razões de transmissão

Na determinação das razões de transmissão de um determinado acionamento, normalmente busca-se uma razão de transmissão que leve a máquina de indução a operar na região de máxima eficiência, ou seja, em velocidades próximas a nominal. Após verificar por meio da aquisição dos sinais de velocidade de translação nos trajetos que serão executados pelos futuros usuários do Vecarr, Silva (2014) especificou a redução do Vecarr por meio da relação das velocidades nominais das máquinas candidatas e da velocidade na qual o Vecarr opera durante a maior parte do trajeto desenvolvido por este, obtendo uma redução de 11,3 : 1.

No desenvolvimento dos manipuladores robóticos em questão, não será possível especificar reduções que levem as máquinas de indução a operar em sua região de máxima eficiência, pois como as velocidades desenvolvidas por estes serão muito baixas, a especificação feita dessa maneira levaria a reduções excessivamente grandes, o que inviabilizaria o projeto. Desta forma, optou-se por determinar as razões de transmissão presentes nos acionamentos de cada uma das juntas, levando-se em conta apenas o torque máximo demandado por estas e o torque nominal de uma lista de motores candidatos. O valor da relação foi limitado a $i = 100$, pelos motivos expostos anteriormente. O cálculo das reduções foi feito como apresentado na Equação 5.1 para cada uma das juntas, trajetórias e máquinas candidatas.

$$i = \frac{T_{CargaMax}}{T_{NomMaqCand}} \tag{5.1}$$

As transmissões utilizadas nesta estrutura são uma combinação entre polias e correias em V e polias e cabo de aço. Segundo Andrade (2014) e Pereira (2014), o rendimento de transmissões utilizando correias em V são da ordem de 97%-98%. Adotou-se de forma geral um rendimento de 97% para cada estágio utilizado e uma relação de transmissão máxima de 5 : 1 para cada estágio.

Nas Tabelas 5.1-5.4 são apresentados os valores de relação de transmissão obtidos utilizando a equação 5.1, para cada uma das trajetórias das máquinas elegíveis (que são apresentadas nas Tabelas 5.8 e 5.9); na simulação de cada máquina utilizou-se o valor médio obtido para as 8 trajetórias.

Tabela 5.1: Relações de transmissão "i" obtidas para a junta 1.

Motor/Trajetória	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**	**Valor Médio**
M1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
M2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
M3	88,8	88,6	90,0	94,8	84,7	83,1	85,9	90,8	88,3
M4	60,0	59,9	60,8	64,1	57,2	56,2	58,0	61,4	59,7
M5	40,1	40,0	40,7	42,8	38,2	37,6	38,8	41,0	39,9
M6	29,4	29,4	29,8	31,4	28,0	27,6	28,4	30,1	29,3
M7	20,0	19,9	20,2	21,3	19,0	18,7	19,3	20,4	19,9

Tabela 5.2: Relações de transmissão "i" obtidas para a junta 2.

Motor/Trajetória	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**	**Valor Médio**
M1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
M2	75,0	74,9	81,7	81,4	81,2	79,8	80,6	82,8	79,7
M3	54,1	54,0	58,9	58,6	58,5	57,5	58,1	59,7	57,4
M4	36,6	36,5	39,8	39,6	39,5	38,9	39,3	40,3	38,8
M5	23,6	23,6	26,6	26,5	26,4	26,0	26,3	27,0	25,8
M6	17,3	17,3	18,9	18,8	18,8	18,4	18,6	19,1	18,4
M7	12,1	12,1	13,2	13,2	13,1	12,9	13,1	13,4	12,9

Tabela 5.3: Relações de transmissão "i" obtidas para a junta 3.

Motor/Trajetória	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	Valor Médio
M1	35,7	35,1	39,2	38,1	39,3	38,1	38,4	39,7	38,0
M2	24,0	23,6	27,2	26,5	27,2	26,4	26,6	27,6	26,1
M3	17,3	17,0	19,0	18,5	19,0	18,4	18,6	19,2	18,4
M4	11,7	11,5	12,8	12,5	12,8	12,5	12,6	13,0	12,4
M5	7,8	7,7	8,6	8,3	8,6	8,3	8,4	8,7	8,3
M6	5,7	5,6	6,3	6,1	6,3	6,1	6,2	6,4	6,1
M7	3,9	3,8	4,3	4,2	4,3	4,1	4,2	4,3	4,1

Tabela 5.4: Relações de transmissão "i" obtidas para a junta 4.

Motor/Trajetória	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	Valor Médio
M1	83,8	96,0	52,0	51,1	43,0	59,4	56,4	36,0	59,7
M2	58,2	66,6	36,0	35,5	29,8	41,2	39,1	24,2	41,3
M3	41,9	48,0	26,0	24,8	20,8	29,7	28,2	17,4	29,6
M4	28,3	32,4	17,0	16,7	14,1	19,4	18,4	11,8	19,8
M5	18,3	21,0	11,4	11,2	9,4	13,0	12,3	7,9	13,1
M6	13,4	15,4	8,3	8,2	6,9	9,5	9,0	5,8	9,6
M7	9,4	10,8	5,8	5,7	4,7	6,7	6,3	3,9	6,7

5.2 Estimação dos parâmetros dos modelos das máquinas de indução propostas

Para a simulação do modelo dinâmico dos motores de indução avaliados, aplicando o modelo por vetores espaciais proposto por Lipo e Novotny (1998), são necessários os parâmetros do circuito equivalente dos mesmos. Como não é viável a realização de ensaios nos motores candidatos, utilizou-se a metodologia apresentada por Silva (2014) para a estimação dos parâmetros a partir dos dados de placa, que são também disponíveis nos catálogos de fabricantes.

Nesta metodologia, os autores identificaram qual grandeza da máquina possui mais sensibilidade às alterações nos parâmetros do circuito equivalente. Na Tabela 5.5 são apresentados os parâmetros e as grandezas mais sensíveis a estes.

Os parâmetros mostrados na Tabela 5.5 podem ser observados na Figura 5.1, onde é apresentado o circuito equivalente por fase de uma máquina de indução trifásica.

Tabela 5.5: Parâmetros do circuito equivalente da máquina e grandezas mais sensíveis a estes.

Parâmetro do circuito equivalente da máquina	**Grandeza 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

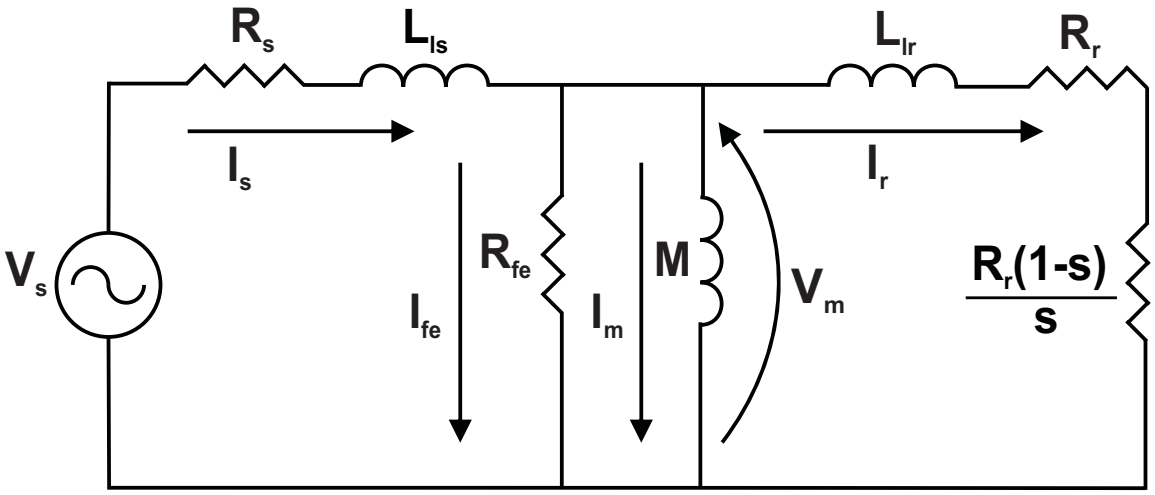


Figura 5.1: Circuito Equivalente por fase de um MIT.

onde:

R_s - Resistência de estator $[\Omega]$

R_r - Resistência de rotor $[\Omega]$

$R_r\dfrac{(1-s)}{s}$ - Resistência que representa a potência mecânica desenvolvida $[\Omega]$

R_{fe} - Resistência de perdas no ferro $[\Omega]$

L_{ls} - Indutância de dispersão de estator $[H]$

L_{lr} - Indutância de dispersão de rotor $[H]$

M - Indutância de magnetização $[H]$

s - Escorregamento $[pu]$

V_s - Tensão de estator de fase $[V]$

V_m - Tensão no ramo de magnetização $[V]$

I_s - Corrente de estator de fase $[A]$
I_r - Corrente de rotor de fase $[A]$
I_{fe} - Corrente que circula na resistência de perdas no ferro $[A]$
I_m - Corrente de magnetização $[A]$

O circuito equivalente da Figura 5.1 representa a máquina de indução trifásica, sendo as resistências R_s, R_r e R_{fe}, responsáveis por representar as perdas no cobre dos enrolamentos do estator, do rotor e no núcleo da máquina, respectivamente. As indutâncias L_{ls} e L_{lr} relacionam-se à dispersão de fluxo nos enrolamentos de estator e rotor, respectivamente, ao passo que M associa-se ao fluxo de magnetização da máquina. O escorregamento s da máquina, representa a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade de rotação do rotor. Por fim, para representar a potência mecânica desenvolvida pela máquina, tem-se a resistência $R_r\dfrac{(1-s)}{s}$.

Conforme apresentado por Silva (2014), dá-se início então ao processo de estimativa dos parâmetros dos circuitos equivalentes, atribuindo valores iniciais para estes. Para que o processo não se torne demasiadamente demorado, as grandezas da máquina são colocadas em pu, sendo que geralmente são utilizados como estimativas iniciais valores típicos de máquinas de indução de grande porte para estes parâmetros, tais como mostrados na Tabela 5.6. Executa-se então a simulação da máquina de indução em regime permanente, variando-se os parâmetros, até que as curvas das grandezas sensíveis a cada parâmetro das máquinas passem pelos pontos nominais de operação destas.

O ajuste dos parâmetros é mais rapidamente atingido seguindo os passos descritos abaixo:

1°) A resistência de rotor é alterada até que a curva de conjugado eletromagnético e de potência de estator passem por seus pontos nominais;

2°) As indutâncias de dispersão de estator e rotor são alteradas até que o ponto de máximo conjugado eletromagnético seja igual ao especificado pelo fabricante;

Tabela 5.6: Faixas típicas dos parâmetros do circuito equivalente para máquinas de indução de grande porte (potência nominal maior que 10 cv).

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

Fonte: Silva (2014).

3°) Ajusta-se o fator de potência nominal por meio de modificações na indutância de magnetização;

4°) Modifica-se o valor da resistência de estator até que se consiga que a curva obtida passe pelo ponto de corrente nominal;

5°) Por fim, altera-se a resistência de perdas no ferro até que se consiga a eficiência descrita no catálogo da máquina.

Deve-se atentar para o fato de que apesar de ter sido identificado que alguns parâmetros são mais sensíveis a determinadas grandezas, estes ainda são sensíveis a outras grandezas. Desta forma, mesmo após o ajuste satisfatório de um determinado parâmetro, este ajuste pode deixar de ser satisfatório com ajuste dos parâmetros subsequentes. Assim, após a finalização do procedimento, deve-se certificar que todos os parâmetros ficaram bem ajustados e, em caso negativo, inicia-se novamente o procedimento para realizar um ajuste fino nos parâmetros da máquina. No passo 2, é importante que a relação entre as reatâncias de dispersão da máquina respeite o que é estabelecido por ABNT (2002), como é apresentado na Tabela 5.7.

Por fim, realiza-se uma simulação do modelo dinâmico da máquina em questão utilizando os parâmetros obtidos para uma verificação final.

Apresentam-se nas Figuras 5.2-5.7 a sequência de passos mencionada para a estimação dos parâmetros do circuito equivalente do motor WEG W22 Plus 1,5CV, 220/380V, 8 polos (M7).

Tabela 5.7: Relação entre as reatâncias X_1 e X_2.

Categoria	**Relação** $\frac{X_1}{X_2}$
Categoria D e motores de rotor bobinado	0,78
Categoria N	0,68
Categoria H	0,58

Fonte: (ABNT, 2002).

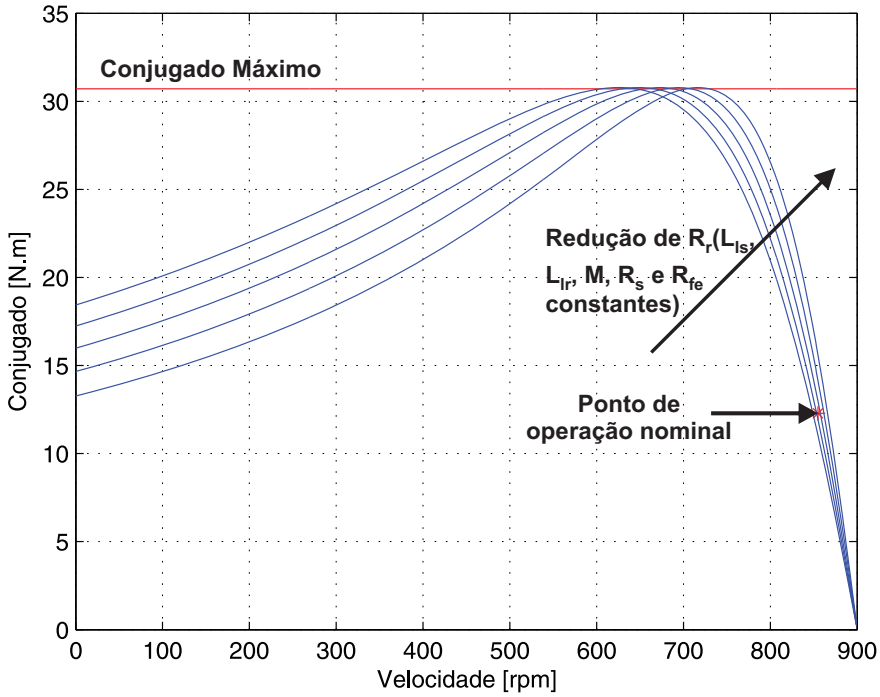


Figura 5.2: Velocidade x conjugado eletromagnético - Tentativas de estimação das resistências de rotor do Motor WEG W22 Plus 1,5CV, 220/380V, 8 polos.

As características das máquinas simuladas são apresentadas na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Características nominais das máquinas de indução avaliadas.

Motor	$\mathbf{P}_n$ $[CV]$	**n** $[rpm]$	$\mathbf{I}_n$ **[A]**	$\mathbf{I}_p/I_n$ **[pu]**	$\mathbf{C}_n$ $[N.m]$	$\mathbf{C}_p/C_n$ $[pu]$	$\mathbf{C}_k/C_n$ $[pu]$	**FP** $[pu]$	η $[pu]$	**J** $[Kg.m^2]$	**Massa** $[Kg]$
8 Polos - 220/380V - 60Hz											
M1	0,16	840	1,10/0,637	3,3	1,42	2,0	2,3	0,60	0,48	0,00186	9,5
M2	0,25	840	1,37/0,793	3,2	2,05	2,0	2,2	0,65	0,53	0,00236	11,5
M3	0,33	835	1,89/1,09	3,2	2,84	2,1	2,3	0,60	0,58	0,00287	13,5
M4	0,50	835	2,44/1,41	3,3	4,21	1,7	2,0	0,64	0,62	0,00492	18,0
M5	0,75	825	3,42/1,98	3,4	6,30	1,7	1,9	0,67	0,63	0,00546	21,5
M6	1,00	835	4,54/2,63	3,8	8,58	2,0	2,3	0,62	0,70	0,00658	23,0
M7	1,50	855	6,04/3,50	4,6	12,26	2,0	2,5	0,61	0,78	0,01266	30,5

Os parâmetros obtidos e as correntes de magnetização das máquinas

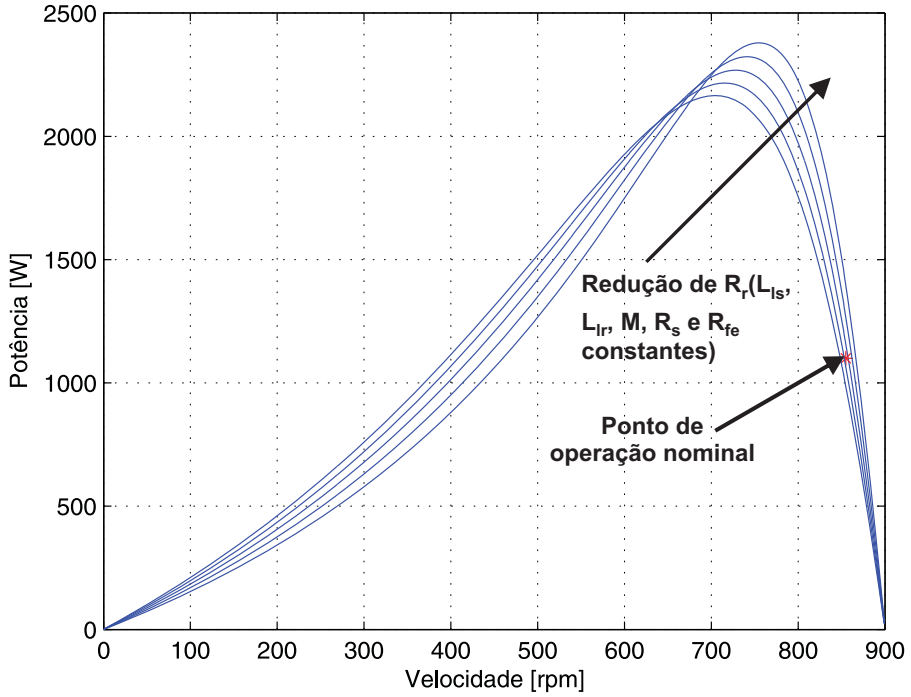


Figura 5.3: Velocidade x potência de saída - Tentativas de estimação das resistências de rotor do Motor WEG W22 Plus 1,5CV, 220/380V, 8 polos.

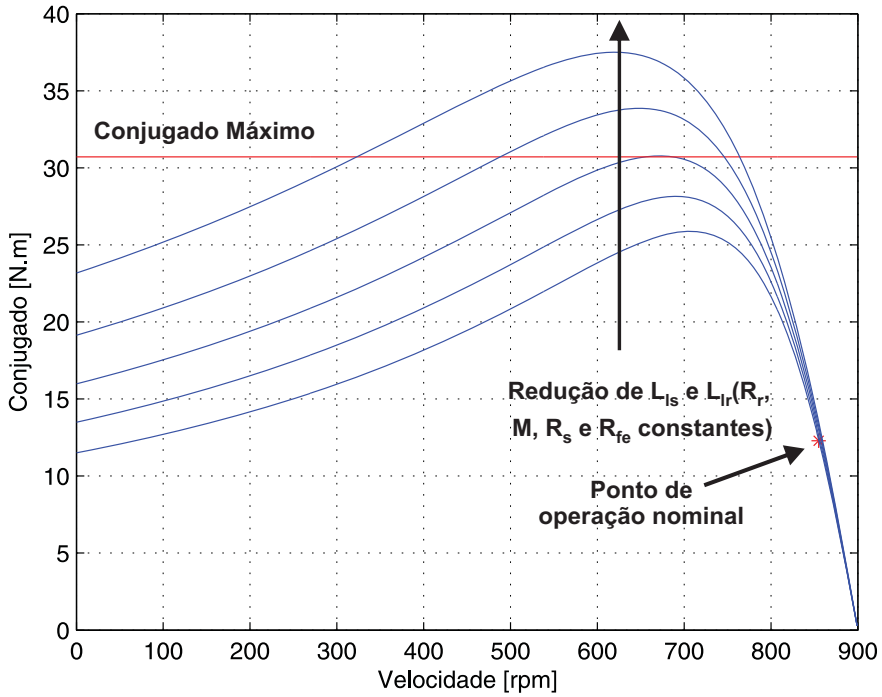


Figura 5.4: Velocidade x conjugado eletromagnético - Tentativas de estimação das indutâncias de dispersão do Motor WEG W22 Plus 1,5CV, 220/380V, 8 polos.

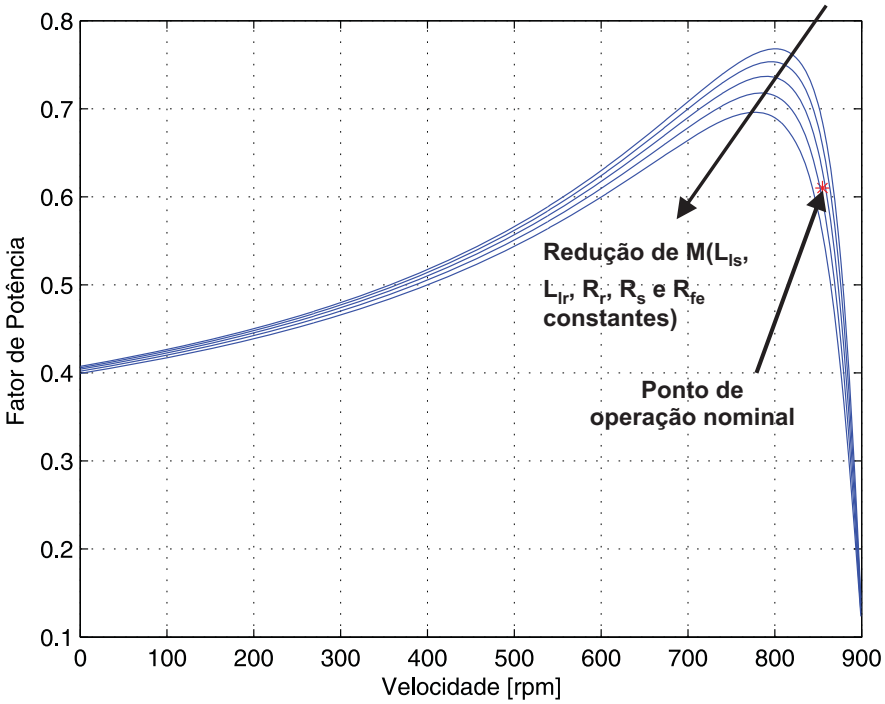


Figura 5.5: Velocidade x fator de potência - Tentativas de estimação da indutância de magnetização do Motor WEG W22 Plus 1,5CV, 220/380V, 8 polos.

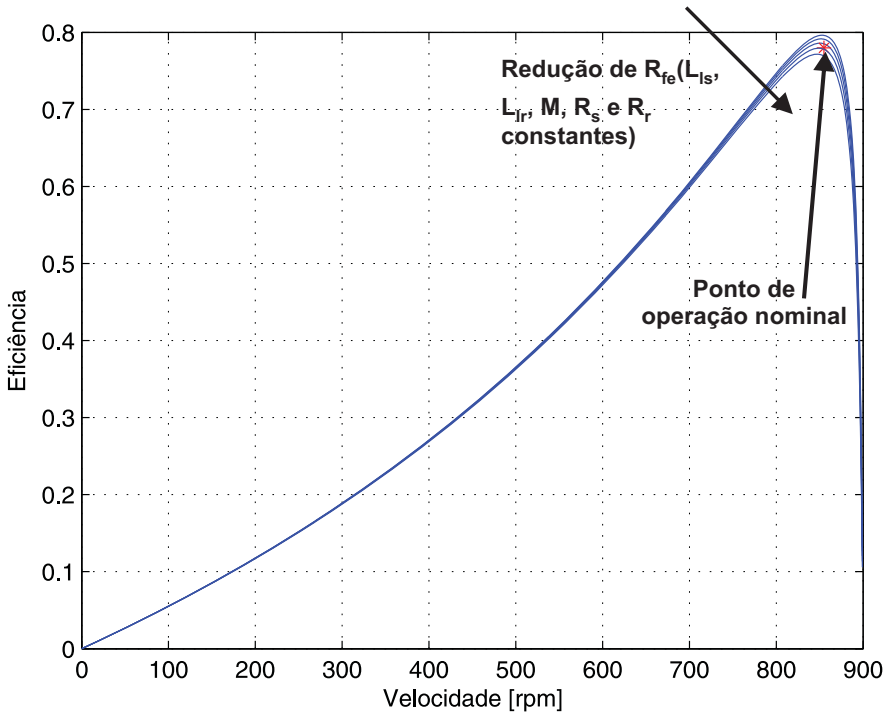


Figura 5.6: Velocidade x Eficiência - Tentativas de estimação da resistência de perdas no ferro do Motor WEG W22 Plus 1,5CV, 220/380V, 8 polos.

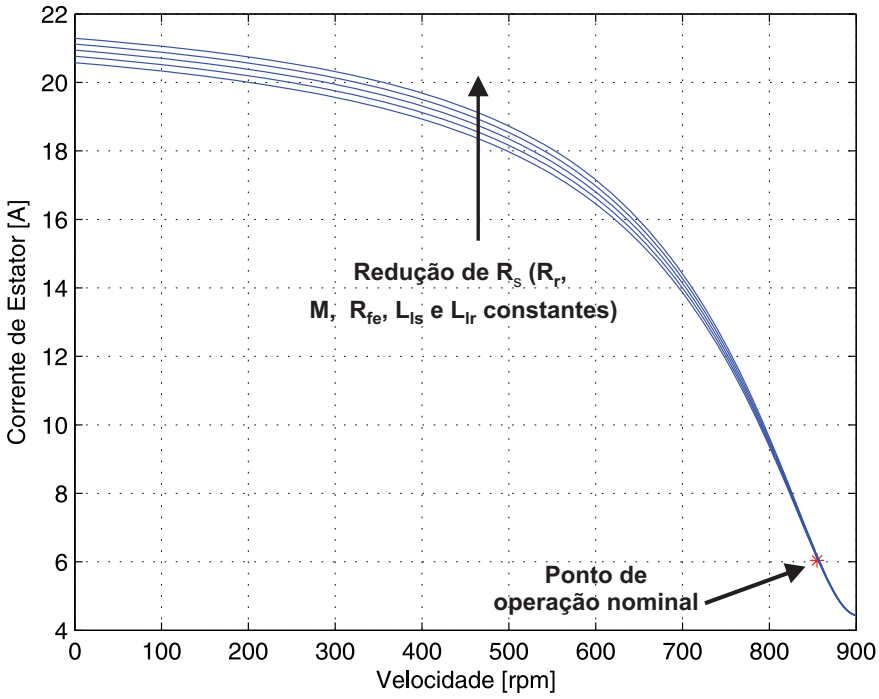


Figura 5.7: Velocidade x Corrente de Estator - Tentativas de estimação da resistência de estator do Motor WEG W22 Plus 1,5CV, 220/380V, 8 polos.

simuladas, que possuem tensão nominal de 220/380V, são apresentados nas Tabelas 5.9 e 5.10, respectivamente.

Tabela 5.9: Parâmetros obtidos para as máquinas de indução avaliadas.

Motor	$\mathbf{R}_s$ [Ω]	$\mathbf{R}_r$ [Ω]	$\mathbf{L}_{ls}$ [mH]	$\mathbf{L}_{lr}$ [mH]	**M** [mH]	$\mathbf{R}_{fe}$ [Ω]
8 Polos						
M1	14,52	14,72	50,50	75,75	337,01	403,33
M2	9,95	11,05	37,23	55,85	292,43	368,38
M3	6,78	8,65	25,84	38,76	194,12	387,20
M4	4,30	5,95	18,49	27,73	158,99	294,32
M5	4,68	4,65	13,26	19,89	123,72	308,00
M6	3,44	3,00	7,77	11,66	83,01	774,40
M7	1,27	1,49	6,30	9,45	69,50	330,00

Tabela 5.10: Correntes de magnetização obtidas para as máquinas de indução avaliadas.

Motor	**Corrente de magnetização [Arms]**
8 Polos	
M1	0,882
M2	1,041
M3	1,532
M4	1,910
M5	2,447
M6	3,682
M7	4,439

5.3 Avaliação do máximo conjugado disponibilizado pelas máquinas frente ao máximo conjugado demandado na aplicação

Nesta seção são avaliados os máximos conjugados disponibilizados pelas máquinas em análise frente ao máximo nível de conjugado de pico demandado na aplicação para cada uma das trajetórias desenvolvidas. Esta avaliação é necessária para que se garanta que as cargas aplicadas às máquinas sejam sempre inferiores ao máximo conjugado disponibilizado pelas mesmas, assegurando sua operação na região estável. Nas Figuras 5.8 - 5.11 são apresentadas as referências de conjugado demandados nos eixos de cada uma das máquinas candidatas para cada uma das juntas, para a trajetória que apresentou o maior valor de conjugado máximo. Na Tabela 5.11 são apresentados de forma resumida os resultados das Figuras 5.8 - 5.11.

Tabela 5.11: Conjugados demandados nos eixos das máquinas, para cada uma das juntas, para a trajetória que apresentou o maior valor de conjugado máximo.

Motor	**Junta / Trajetória**			
	Junta 1 / T4	**Junta 2 / T8**	**Junta 3 / T8**	**Junta 4 / T2**
M1	2,45	1,54	1,35	2,08
M2	2,45	1,94	1,97	3,01
M3	2,78	2,69	2,80	4,20
M4	4,11	3,98	4,15	6,28
M5	6,15	5,99	6,20	9,49
M6	8,38	8,40	8,43	12,95
M7	12,34	11,98	12,55	18,55

Por meio da Tabela 5.11 e das Figuras 5.14 - 5.20 pode-se comparar os máximos dos níveis demandados com os dos conjugados disponibilizados pelas máquinas em análise. A partir desta comparação, concluiu-se que todas as máquinas candidatas possuem conjugado máximo superior ao maior valor de conjugado requerido para todas as juntas e trajetórias. Apesar disto, ainda é necessário avaliar se as máquinas são capazes de acionar a carga dentro da região de linearidade entre conjugado eletromagnético e a componente de conjugado da corrente de estator. Esta avaliação é apresentada na próxima seção.

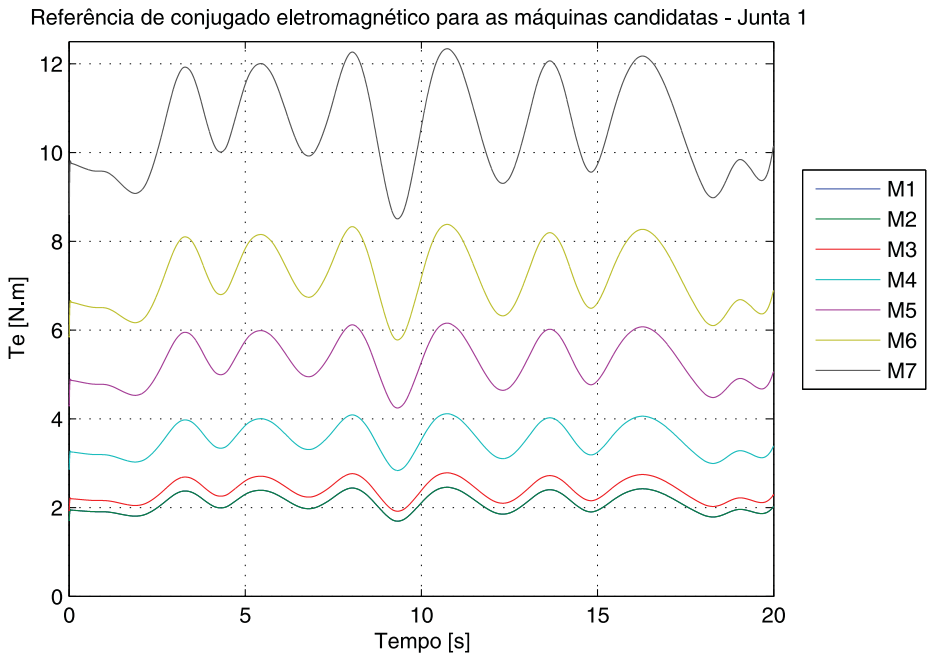


Figura 5.8: Tempo x Referência de conjugado eletromagnético para a trajetória de máxima demanda conjugado (Trajetória 4 - Junta 1) obtida por meio das trajetórias medidas e do modelo dinâmico dos manipuladores robóticos para as máquinas candidatas e suas respectivas razões de transmissão.

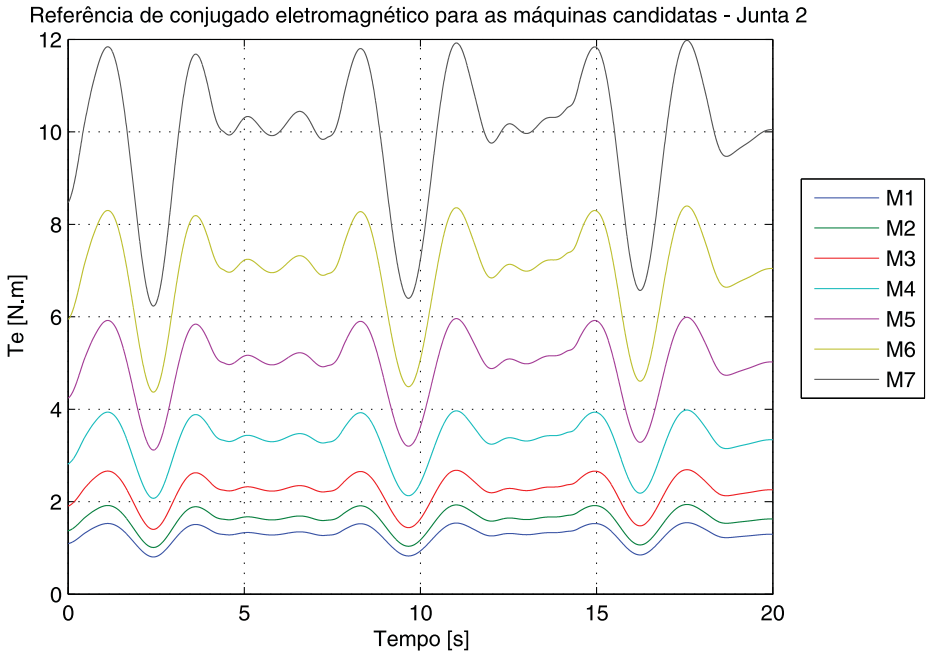


Figura 5.9: Tempo x Referência de conjugado eletromagnético para a trajetória de máxima demanda conjugado (Trajetória 8 - Junta 2) obtida por meio das trajetórias medidas e do modelo dinâmico dos manipuladores robóticos para as máquinas candidatas e suas respectivas razões de transmissão.

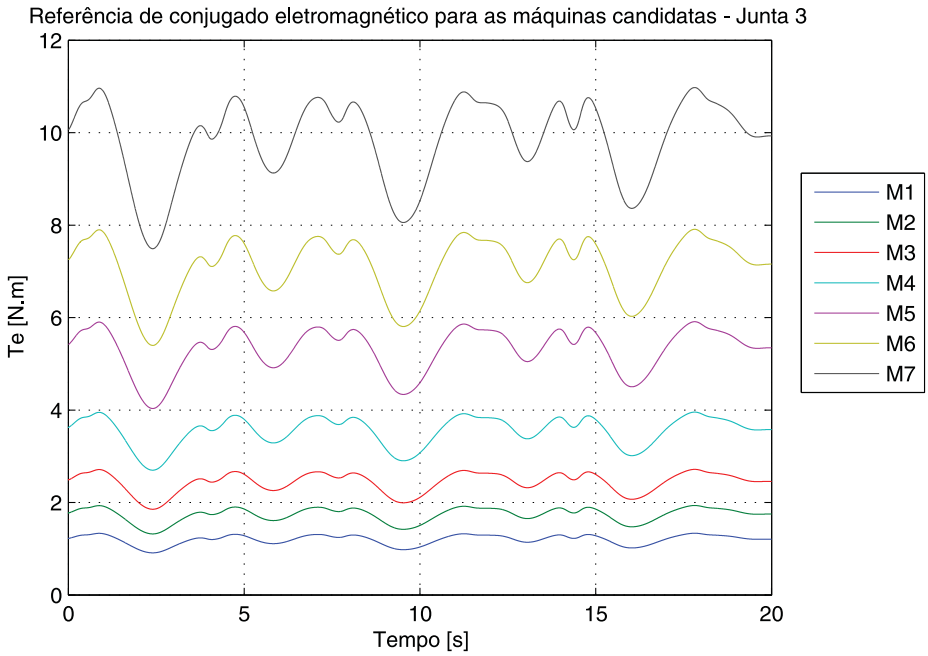


Figura 5.10: Tempo x Referência de conjugado eletromagnético para a trajetória de máxima demanda conjugado (Trajetória 8 - Junta 3) obtida por meio das trajetórias medidas e do modelo dinâmico dos manipuladores robóticos para as máquinas candidatas e suas respectivas razões de transmissão.

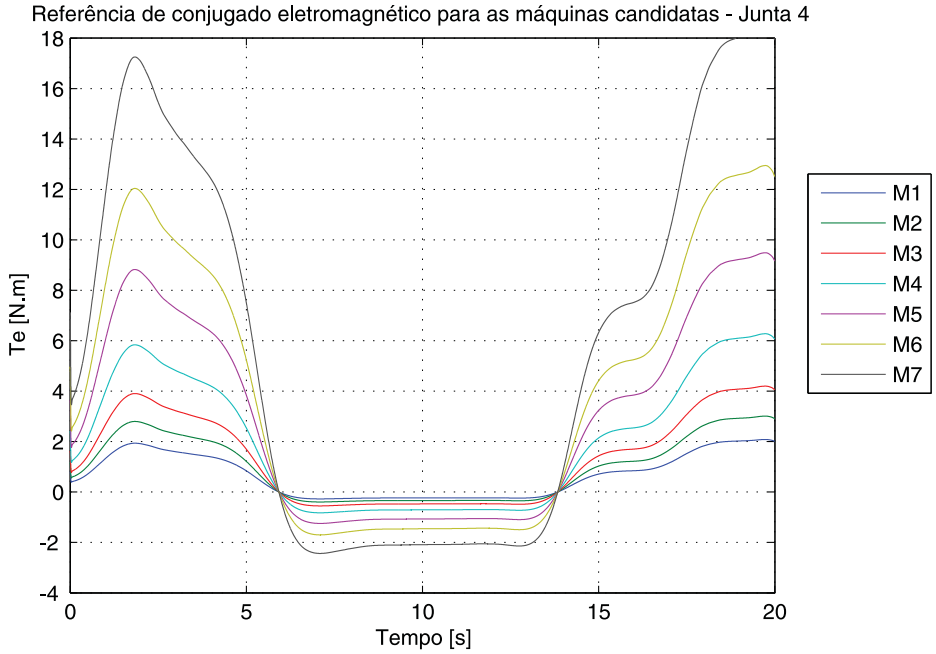


Figura 5.11: Tempo x Referência de conjugado eletromagnético para a trajetória de máxima demanda conjugado (Trajetória 2 - Junta 4) obtida por meio das trajetórias medidas e do modelo dinâmico dos manipuladores robóticos para as máquinas candidatas e suas respectivas razões de transmissão.

5.4 Avaliação da região de linearidade entre corrente de estator e conjugado para cada uma das máquinas candidatas à aplicação

Conforme Silva (2014), deve-se garantir que as máquinas operem sempre na região de linearidade entre conjugado e corrente de conjugado, pois assim garante-se que o material ferromagnético que a constitui não entre em saturação. Ainda segundo Silva (2014), desta forma, os parâmetros estimados pelo auto ajuste do conversor para o circuito equivalente da máquina não se tornam significativamente diferentes dos parâmetros reais do circuito equivalente da máquina. E, operando nesta região de linearidade o conversor consegue obter uma boa estimativa da orientação espacial do sistema dq de referência utilizado pelo mesmo e garante-se o desacoplamento das componentes em quadratura de corrente e o bom desempenho dinâmico do sistema.

Para sistemas utilizando controle controle vetorial, onde há desacoplamento entre as correntes responsáveis pela produção de torque e fluxo, como é utilizado no acionamento destes manipuladores, o circuito equivalente apresentado anteriormente (Figura 5.1) não é o mais adequado para esta análise. Desta forma, foi utilizado o circuito equivalente da máquina de indução apresentado por Lipo e Novotny (1998) e que é mostrado na Figura 5.12.

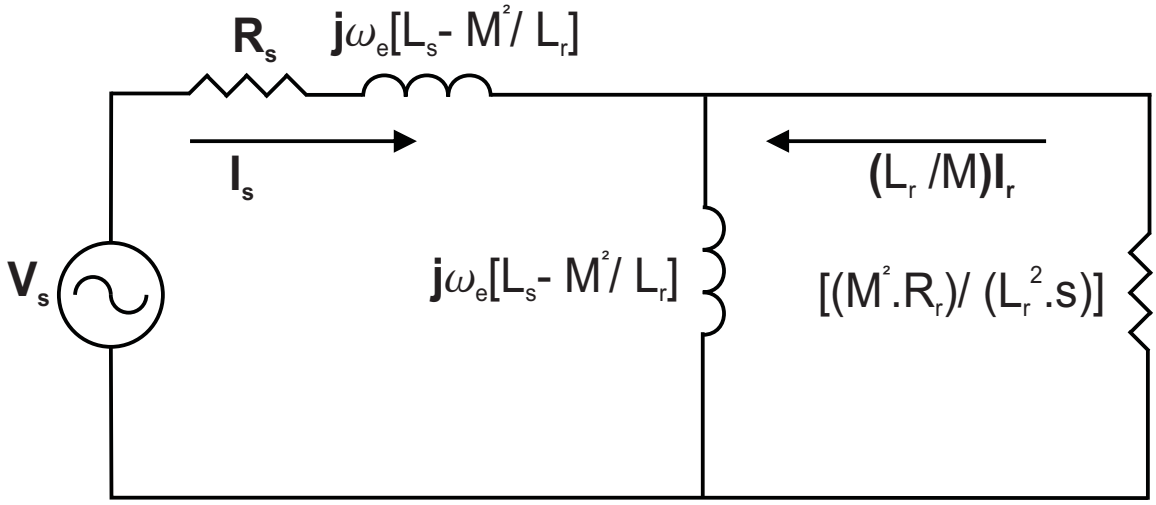


Figura 5.12: Circuito equivalente da máquina de indução modificado.

Fonte: Lipo e Novotny (1998).

Na Figura 5.13 exibe-se uma outra forma de retratar o circuito exposto na Figura 5.12, onde são apresentadas as correntes em quadratura I_{sd} e I_{sq}, responsáveis pela produção de fluxo e torque, respectivamente.

Para realizar esta análise e garantir operação das máquinas na região de linearidade para todas as juntas e trajetórias, nas Figuras 5.14 - 5.20 foram traçadas curvas da componente de conjugado da corrente de estator x conjugado eletromagnético para escorregamentos variando de 0 a 1, para todas as máquinas em análise, utilizando-se o circuito da Figura 5.13. Posteriormente, foram comparados os máximos conjugados demandados por cada uma das juntas e máquinas candidatas (5.11) e os máximos conjugados de cada uma destas onde deixa de existir a linearidade.

Percebe-se, ao analisar as Figuras 5.14 - 5.20, que até aproximadamente

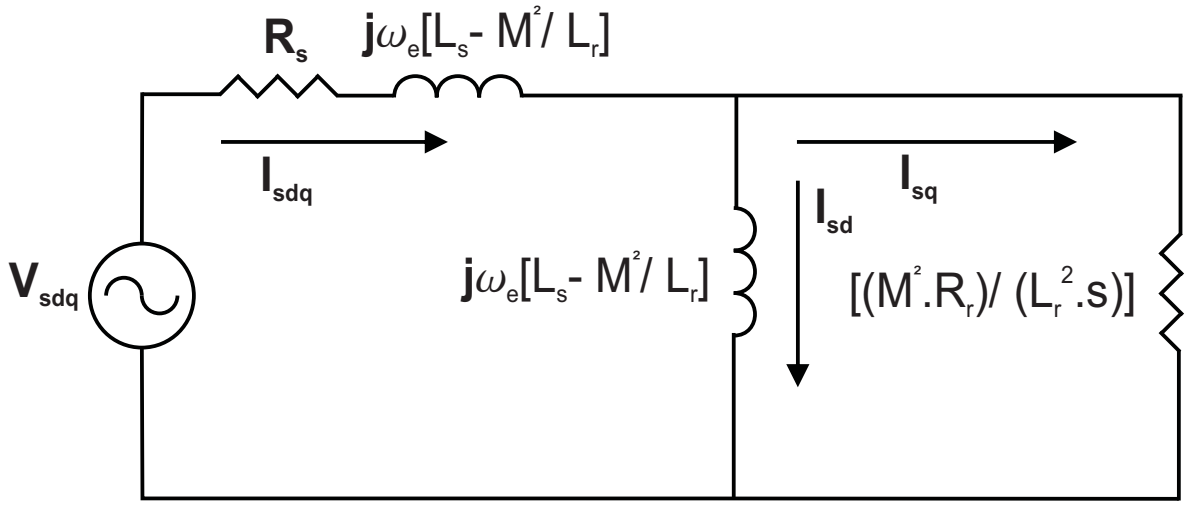


Figura 5.13: Circuito equivalente em regime permanente da máquina de indução para correntes dq.

Fonte: Lipo e Novotny (1998).

1,5 vezes o torque nominal, as curvas da componente de conjugado da corrente de estator x conjugado eletromagnético, para escorregamentos variando de 0 a 1 e para todas as máquinas candidatas, podem ser consideradas lineares e para esta faixa de torques de carga as máquinas são adequadas. Apenas a máquina **M1** não é adequada para o acionamento da junta 1, pois, para esta situação a mesma teria que acionar uma carga de até 1,73 vezes seu torque nominal, saindo então da região de linearidade.

Por fim, como a carga demandada dos motores em alguns momentos é superior ao seu conjugado nominal e, principalmente, como o motor opera em velocidades abaixo da nominal, deve-se garantir que as máquinas operem dentro dos limites de temperatura de classe isolamento para as quais as mesmas foram projetadas. Esta análise será realizada na Seção 5.6.

5.5 Controle Vetorial com Orientação Indireta de Campo pelo Fluxo de Rotor

Para a simulação dos acionamentos dos motores de indução, será utilizado o controle vetorial com orientação indireta de campo pelo fluxo de

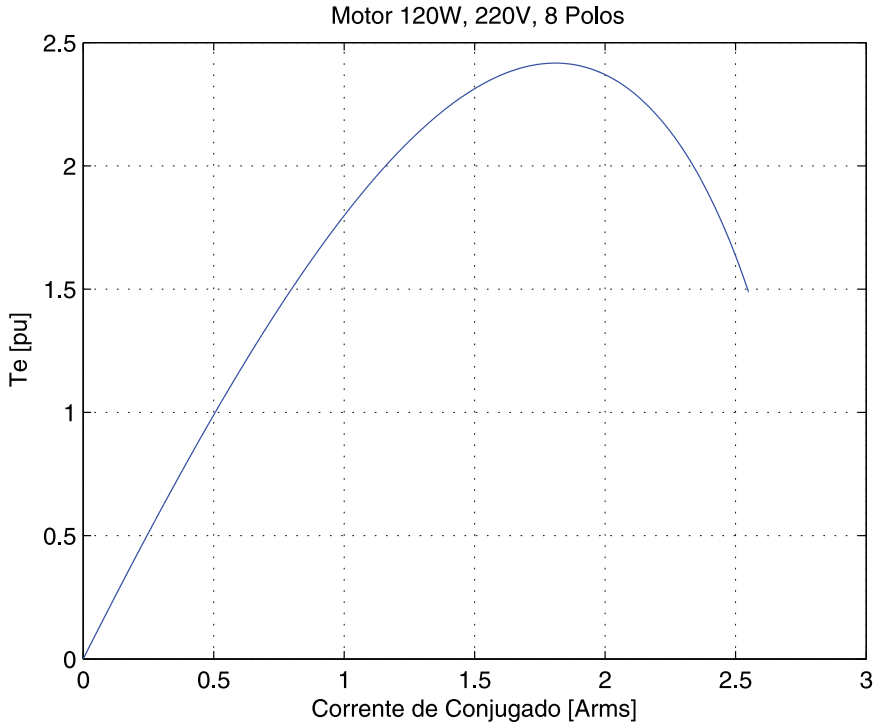


Figura 5.14: Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator do Motor WEG W22 Plus 0,16CV, 220/380V, 8 polos.

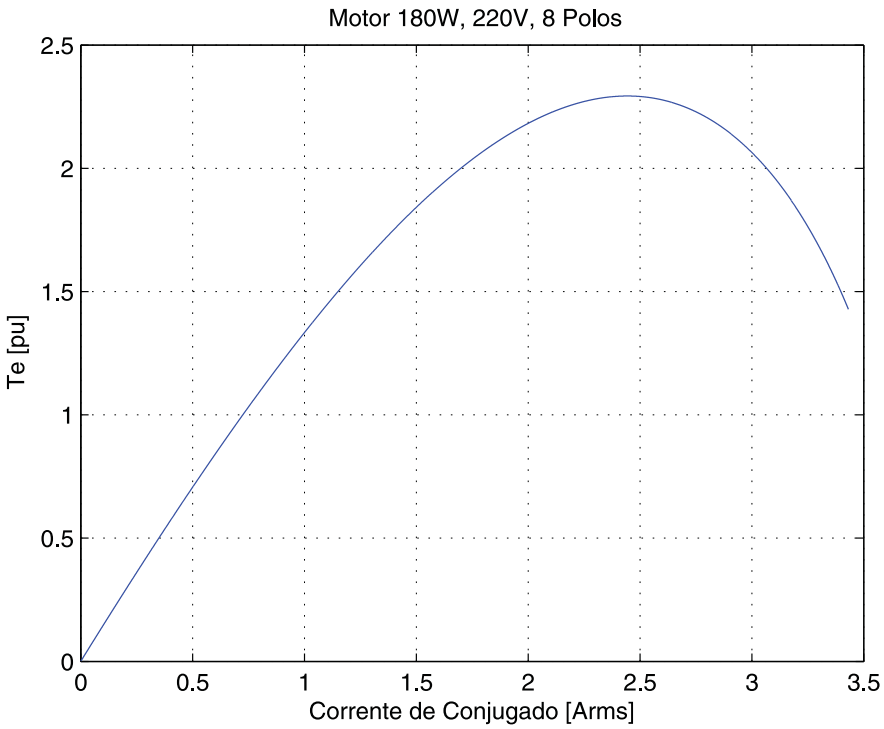


Figura 5.15: Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator do Motor WEG W22 Plus 0,25CV, 220/380V, 8 polos.

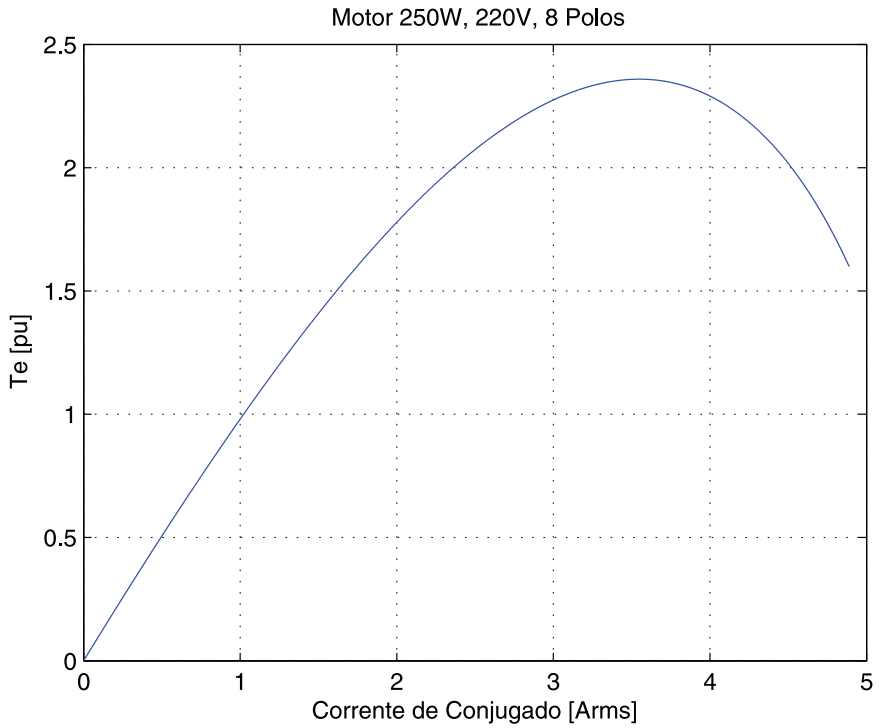


Figura 5.16: Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator do Motor WEG W22 Plus 0,33CV, 220/380V, 8 polos.

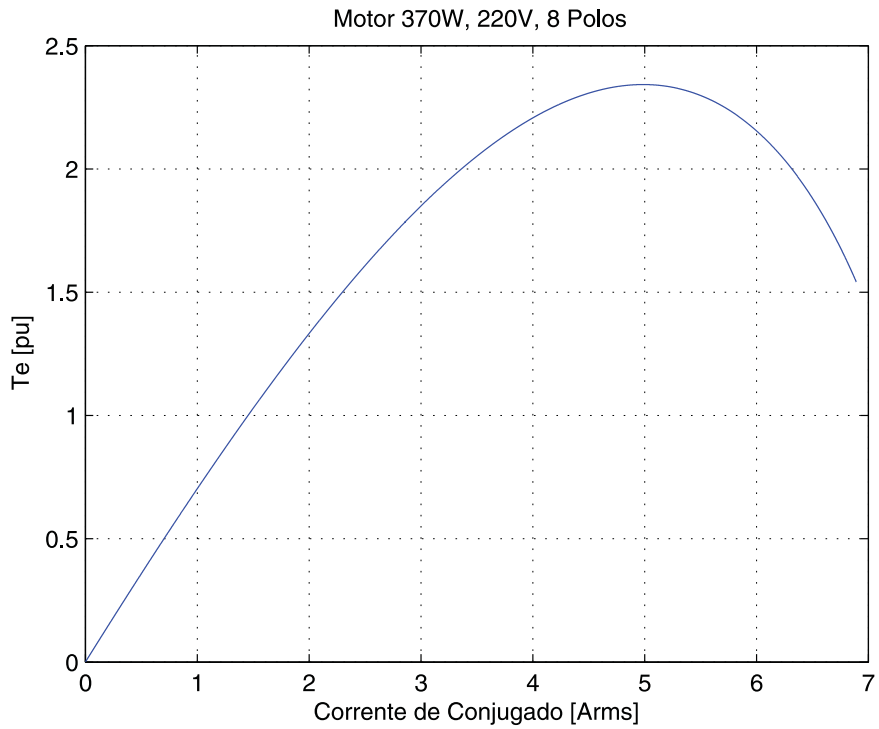


Figura 5.17: Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator do Motor WEG W22 Plus 0,50CV, 220/380V, 8 polos.

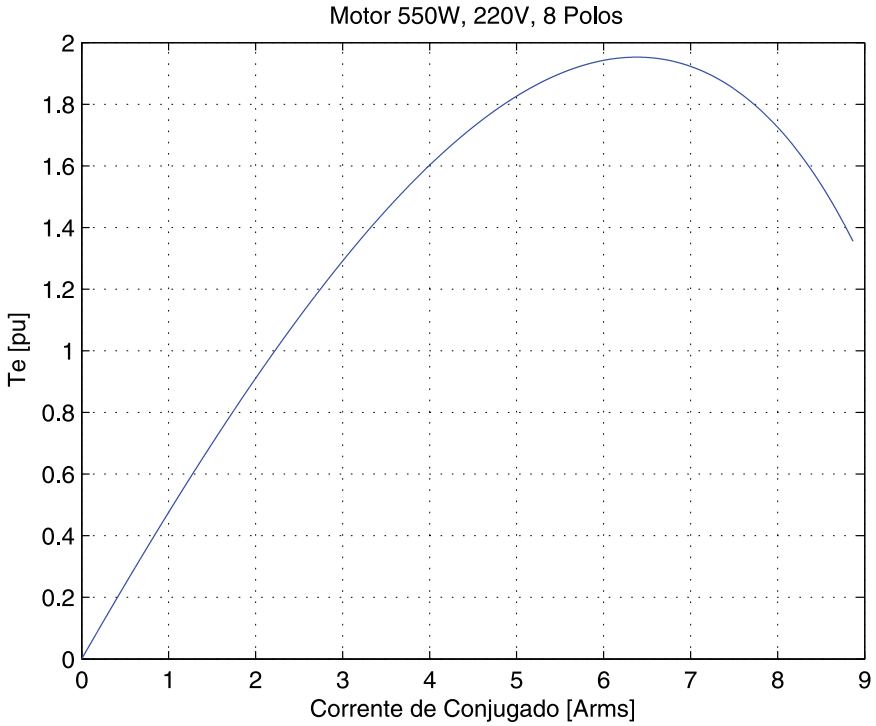


Figura 5.18: Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator do Motor WEG W22 Plus 0,75CV, 220/380V, 8 polos.

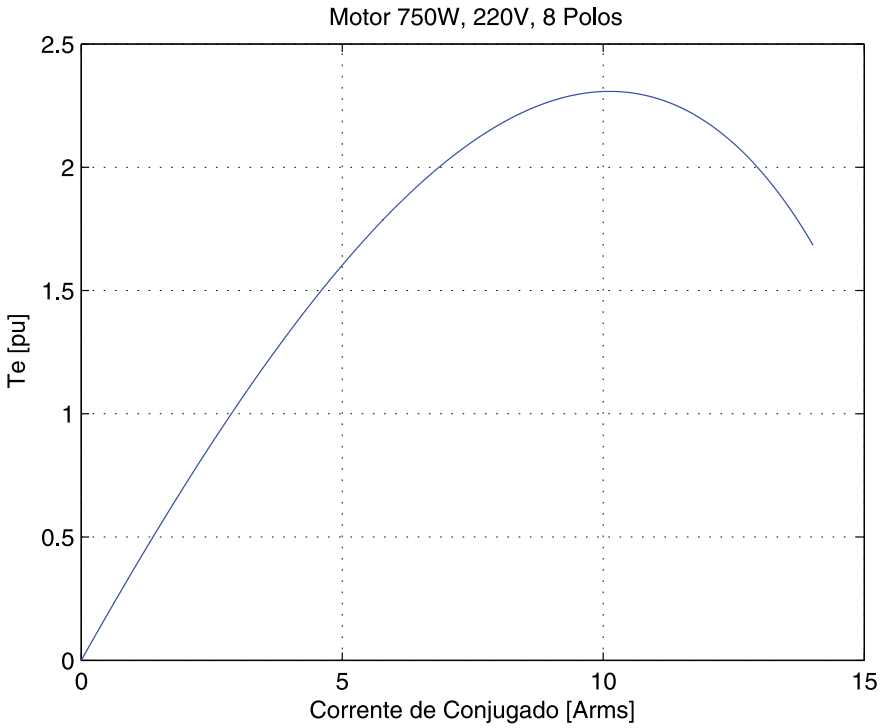


Figura 5.19: Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator do Motor WEG W22 Plus 1,0CV, 220/380V, 8 polos.

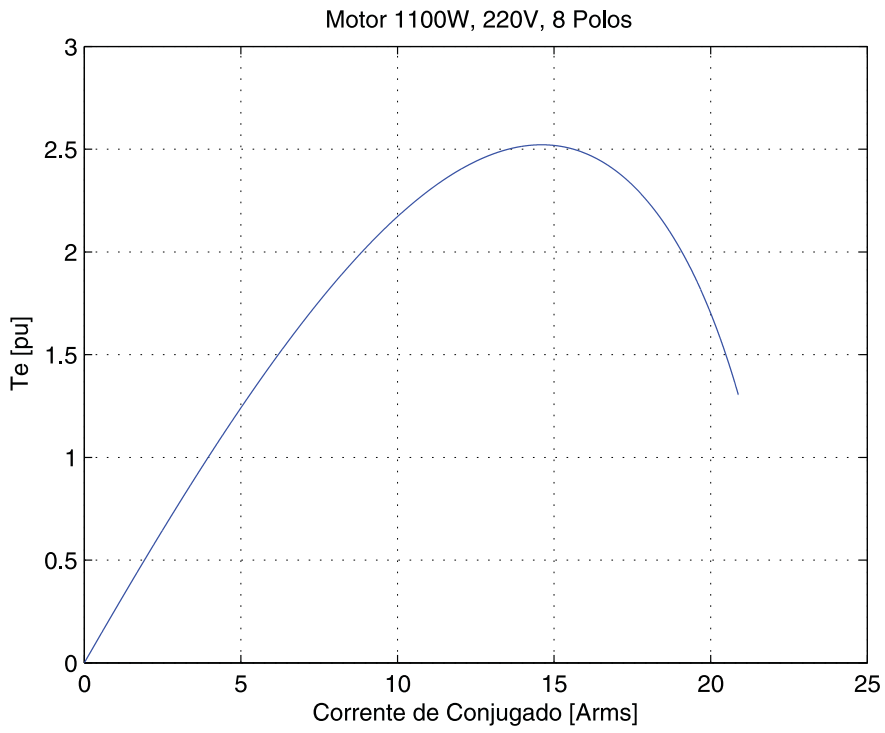


Figura 5.20: Curva de conjugado eletromagnético x componente de conjugado da corrente de estator do Motor WEG W22 Plus 1,5CV, 220/380V, 8 polos.

rotor, técnica que é apresentada em Lipo e Novotny (1998).

Inicia-se a sintonia dos reguladores a partir de uma malha que tem como objetivo regular a velocidade, que é apresentada na Figura 5.21. A função de transferência é dada pela Equação 5.2.

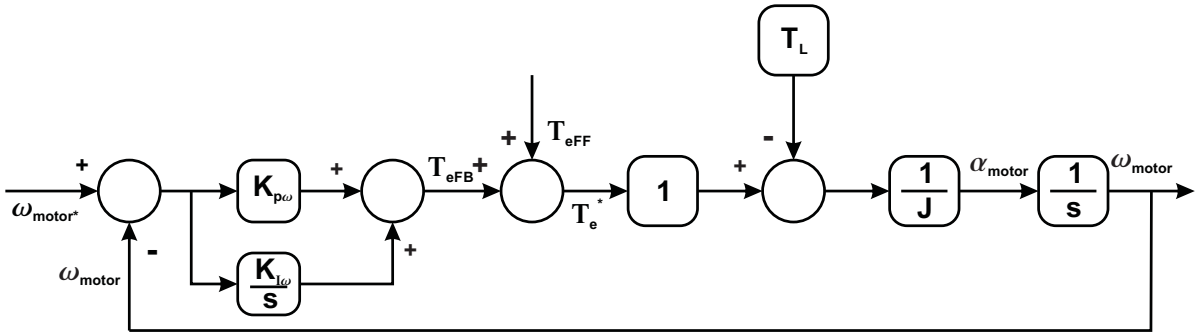


Figura 5.21: Malha de regulação de velocidade.

$$\frac{W}{W^*} = \frac{\left(K_{P\omega} + \frac{K_{I\omega}}{s}\right)}{\left(sJ + K_{P\omega} + \frac{K_{I\omega}}{s}\right)} \tag{5.2}$$

Em uma análise para sinais de altas frequências, o polinômio característico da função de transferência apresentada na equação 5.2 se reduz à equação 5.3.

$$sJ + K_{P\omega} = 0 \tag{5.3}$$

Desta forma, obtém-se o polo deste polinômio característico, o qual é alocado na banda passante de velocidade, como apresentado na equação 5.4.

$$s_{p1} = \frac{-K_{P\omega}}{J} = -B_{\omega_\omega} \therefore K_{P\omega} = JB_{\omega_\omega} \tag{5.4}$$

Em uma análise para sinais de baixas frequências, o polinômio característico da função de transferência apresentada na equação 5.2 se reduz à equação 5.5.

$$K_{P\omega} + \frac{K_{I\omega}}{s} = 0 \tag{5.5}$$

Desta forma, obtém-se o polo deste polinômio característico, o qual é alocado uma década abaixo da banda passante de velocidade, como apresentado na equação 5.6.

$$s_{p2} = \frac{-K_{I\omega}}{K_{P\omega}} = \frac{-B_{\omega_\omega}}{10} \therefore K_{I\omega} = \frac{K_{P\omega}B_{\omega_\omega}}{10} \tag{5.6}$$

Segue-se então para as malhas de corrente. Para isto, o bloco do conversor de energia apresentado na Figura 5.21 como sendo um bloco de ganho unitário pode ser modelado como mostra a Figura 5.22.

Analisando a Figura 5.22, a malha de corrente I_{sq} é obtida e apresentada na Figura 5.23.

Obtém-se então a função de transferência para a malha de corrente I_{sq},

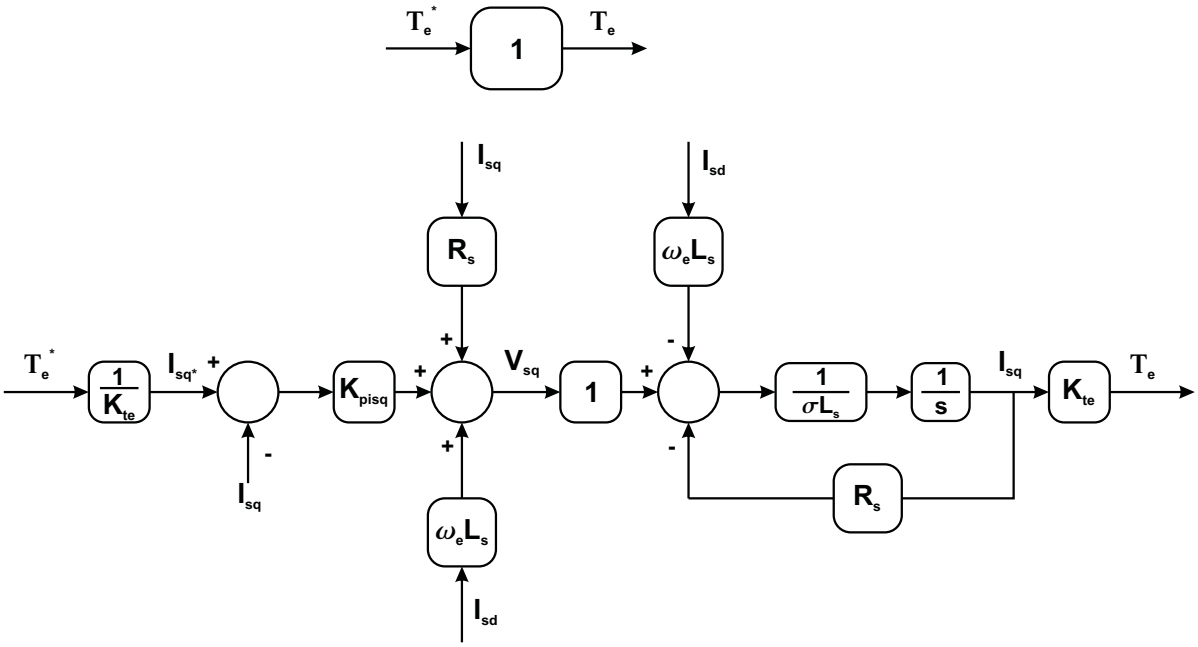


Figura 5.22: Conversor de Energia.

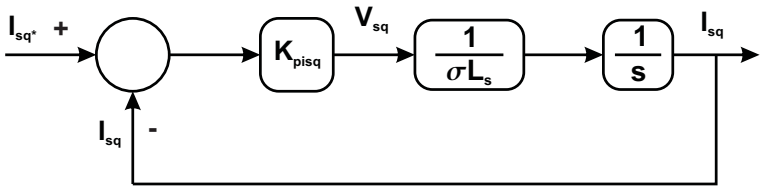


Figura 5.23: Malha de corrente I_{sq}.

apresentada na Figura 5.23, a qual é apresentada na equação 5.7.

$$\frac{I_{sq}}{{I_{sq}}^*} = \frac{1}{\left(\dfrac{s\sigma L_{ss}}{K_{Pisq}} + 1\right)} \tag{5.7}$$

A partir da função de transferência apresentada na equação 5.7, foi obtido o polinômio característico apresentado na equação 5.8 e o valor do seu polo.

$$s\sigma L_{ss} + K_{Pisq} = 0 \therefore s_{p3} = \frac{-K_{Pisq}}{\sigma L_{ss}} = -B_{\omega_{Isq}} \tag{5.8}$$

Como a malha de corrente Isq é mais interna à malha de velocidade, o

polo do polinômio característico apresentado na equação 5.8 será alocado uma década acima da banda passante de velocidade, como apresentado na equação 5.9.

$$B_{\omega_{Isq}} = 10B_{\omega_\omega} \therefore K_{Pisq} = 10B_{\omega_\omega}\sigma L_{ss} \tag{5.9}$$

Por fim, parte-se para a malha de corrente I_{sd}, a qual é apresentada na Figura 5.24 e tem sua função de transferência apresentada na equação 5.10.

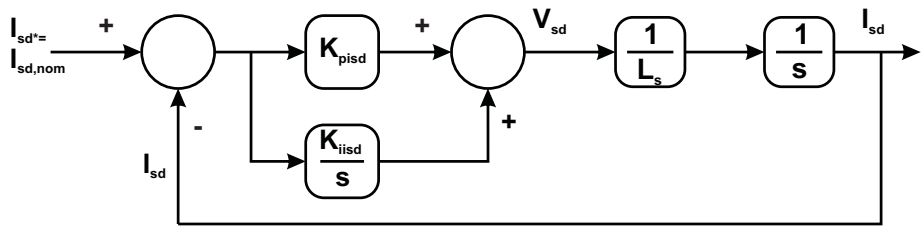


Figura 5.24: Malha de corrente I_{sd}.

$$\frac{I_{sd}}{{I_{sd}}^*} = \frac{\left(K_{Pisd} + \dfrac{K_{Iisd}}{s}\right)}{\left(sL_{ss} + K_{Pisd} + \dfrac{K_{Iisd}}{s}\right)} \tag{5.10}$$

Em uma análise para sinais de altas frequências, o polinômio característico da função de transferência apresentada na equação 5.10 se reduz à equação 5.11.

$$s.L_{ss} + K_{Pisd} = 0 \therefore s_{p4} = \frac{-K_{Pisd}}{L_{ss}} = -B_{\omega_{Isd}} \tag{5.11}$$

Como a malha de corrente Isd é mais interna à malha de velocidade, o polo do polinômio característico apresentado na equação 5.11 será alocado uma década acima da banda passante de velocidade, como apresentado na equação 5.12.

$$B_{\omega_{Isd}} = 10B_{\omega_\omega} \therefore K_{Pisd} = 10B_{\omega_\omega}L_{ss} \tag{5.12}$$

Já em uma análise para sinais de baixas frequências, o polinômio característico da função de transferência apresentada na equação 5.10 se reduz à equação 5.13.

$$K_{Pisd} + \frac{K_{Iisd}}{S} = 0 \therefore s_{p5} = \frac{-K_{Iisd}}{K_{Pisd}} \tag{5.13}$$

Aloca-se este polo uma década abaixo da banda passante de velocidade como apresentado na equação 5.14.

$$K_{Iisd} = \frac{K_{Pisd} B_{\omega_\omega}}{10} \tag{5.14}$$

Desta forma, a sintonia dos reguladores que são utilizados nas malhas de corrente e velocidade é realizada utilizando-se as equações (5.15) - (5.19).

$$K_{P\omega} = J B_{\omega_\omega} \tag{5.15}$$

$$K_{I\omega} = K_{P\omega} B_{\omega_\theta} \tag{5.16}$$

$$K_{Pisq} = 10 B_{\omega_\omega} \sigma L_{ss} \tag{5.17}$$

$$K_{Pisd} = 10 B_{\omega_\omega} L_{ss} \tag{5.18}$$

$$K_{Iisd} = K_{Pisd} B_{\omega_\theta} \tag{5.19}$$

Para a banda passante de velocidade B_{ω_ω}, que é utilizada na sintonia dos reguladores das malhas de corrente e velocidade, partiu-se dos valores máximos de banda passante obtidos para cada uma das juntas, apresentados na Tabela 4.7, realizando-se ajustes para a redução dos erros de rastreamento de trajetória. Como os sinais de posição e integral de posição são mais lentos, as bandas passantes de posição apresentada na equação 5.20 e integral de posição apresentada na equação 5.21 foram alocadas uma e duas décadas abaixo da primeira, respectivamente.

$$B_{\omega_\theta} = \frac{B_{\omega_\omega}}{10} \tag{5.20}$$

$$B_{\omega_{\int\theta}} = \frac{B_{\omega_\theta}}{10} \tag{5.21}$$

Na sequência, foi elaborada uma estrutura de simulação, apresentada na Figura 5.25. Para mostrar os resultados obtidos por meio da sintonia realizada e malha de controle utilizada, na Seção 5.8 são apresentadas as velocidades angulares mecânicas de referência, as velocidades desenvolvidas pelas máquinas especificadas e o erro de rastreamento de trajetória para cada uma das 4 juntas dos manipuladores, para uma das trajetórias simuladas.

5.6 Avaliação da temperatura alcançada pelas máquinas

Os motores adequados para o acionamento até a presente seção, mesmo que tenham capacidade de prover o conjugado demandado pelos manipuladores durante toda sua trajetória, são passíveis de queima caso sejam mantidos em sobrecarga por períodos muito longos ou caso não consigam se resfriar de forma satisfatória entre uma sobrecarga e outra. Os motores utilizados neste acionamento são autoventilados, serão acionados por conversores de frequência, e irão trabalhar em ampla faixa de velocidade, operando até em velocidade zero. O sistema de resfriamento dos motores autoventilados é projetado para que o motor possa acionar cargas de até seu valor nominal vezes o seu fator de serviço (FS) de forma contínua, desde que a frequência da tensão de alimentação seja constante e nominal.

O sistema de resfriamento de motores autoventilados se dá por meio de um ventilador acoplado ao eixo de carga, de forma que a vazão de ar em ventiladores é proporcional à velocidade destes. Assim, operando à frequência fixa e nominal, a taxa de remoção de calor é constante e, caso a produção de calor seja inferior ao valor nominal para a qual o motor

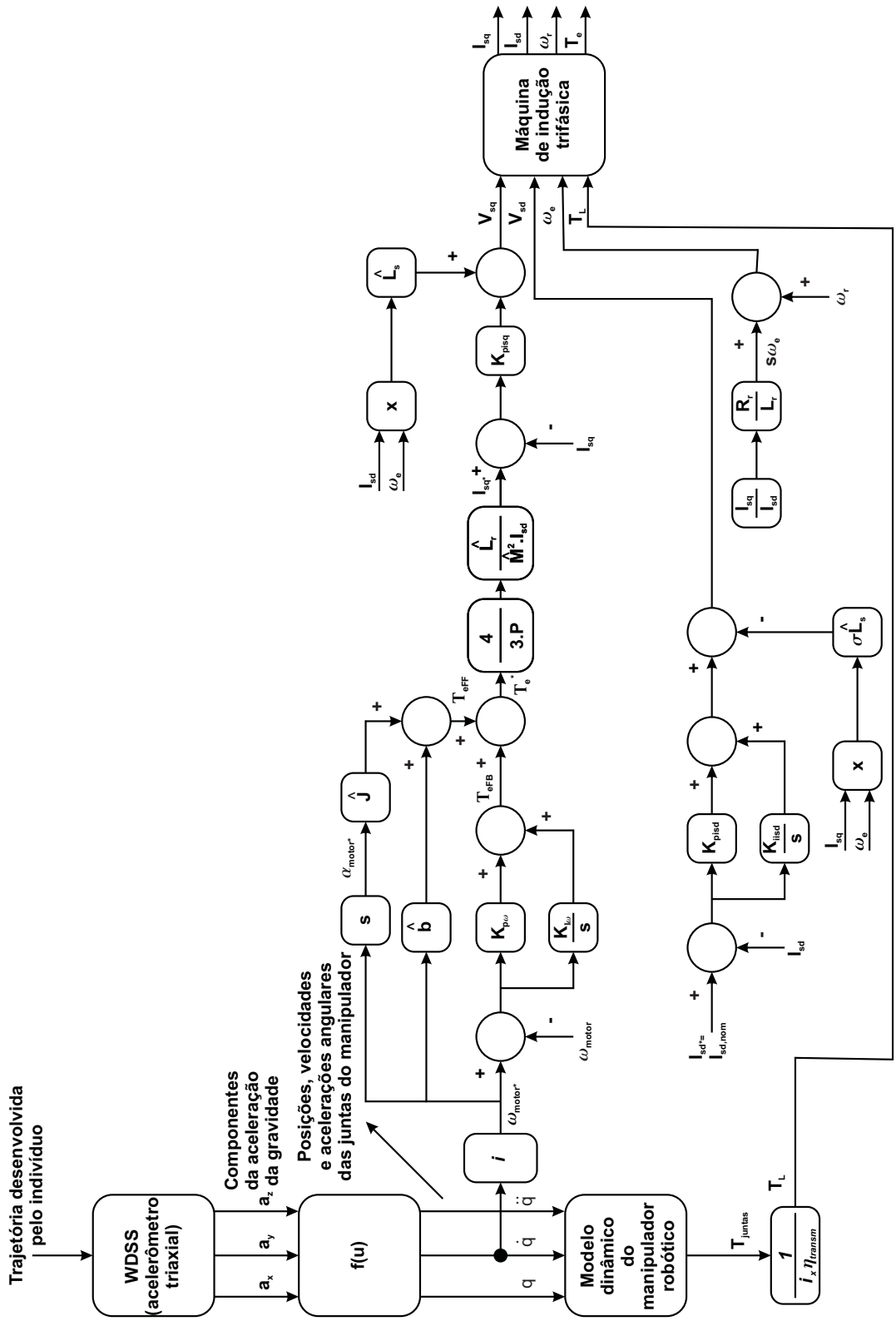


Figura 5.25: Diagrama de blocos para simulação das máquinas elétricas candidatas ao acionamento dos manipuladores robóticos, considerando as demandas de trajetória e torque reais medidas utilizando 2 indivíduos.

foi projetado, este não se queima. Entretanto, quando se opera motores autoventilados em velocidades inferiores à nominal, seu resfriamento fica comprometido. Deve-se então, de alguma forma, avaliar qual é a temperatura que estes atingem para as cargas e velocidades que estes operarão, para garantir que estes não ultrapassem a temperatura máxima de sua classe de isolação e, por consequência, se queimem.

Deve-se avaliar então, dentre os motores selecionados, quais são capazes de realizar o acionamento sem exceder o limite de temperatura previsto em sua classe de isolação. Nestas máquinas, as maiores responsáveis pela produção de calor são as perdas no cobre do estator e rotor. Sendo estas perdas proporcionais ao quadrado da corrente de estator, é possível avaliar a produção de calor por meio da corrente térmica equivalente em um ciclo de trabalho da máquina. A Equação 5.22 apresenta como é realizado o cálculo da corrente térmica equivalente.

$$i_{térmica} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \cdot \int_0^{T_0} i_{srms}(t)^2 \cdot \mathrm{d}t} \tag{5.22}$$

onde:

T_0 representa o período de um ciclo de trabalho da máquina;

$i_{srms}(t)$ é a corrente instantânea (RMS) de estator da máquina.

Assim como no caso do Vecarr projetado por Silva (2014), para o acionamento dos manipuladores, o cálculo da corrente térmica equivalente também não permite prever se a máquina irá queimar-se pois a velocidade de operação é variável, operando até em velocidade nula. Assim, a taxa de remoção de calor também será variável, tornando ineficiente a utilização do cálculo da corrente térmica equivalente.

Nesse contexto, um modelo térmico da máquina para o cálculo da temperatura é proposto por Avolio (1992), cujos circuitos equivalentes são apresentados nas Figuras 5.26 e 5.27.

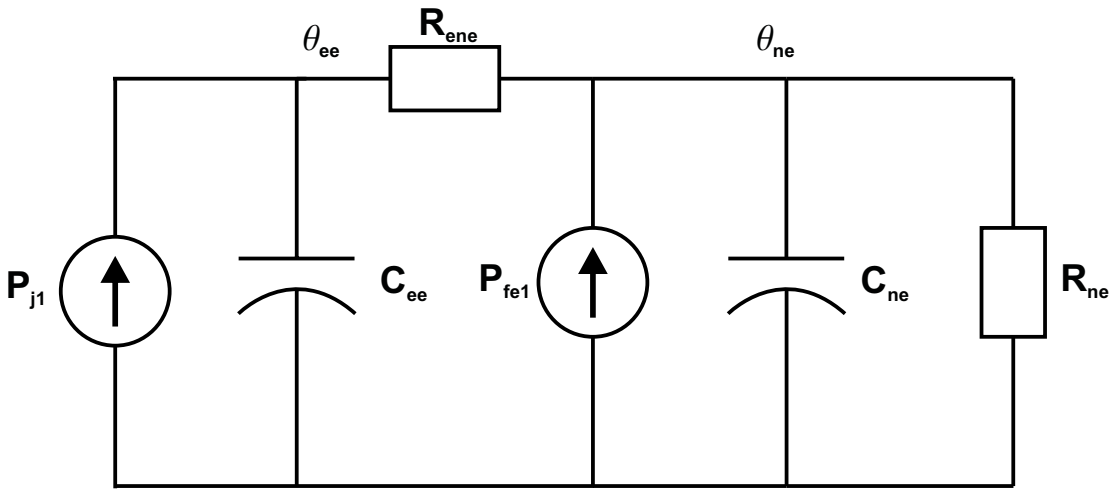


Figura 5.26: Circuito térmico do estator da máquina de indução.

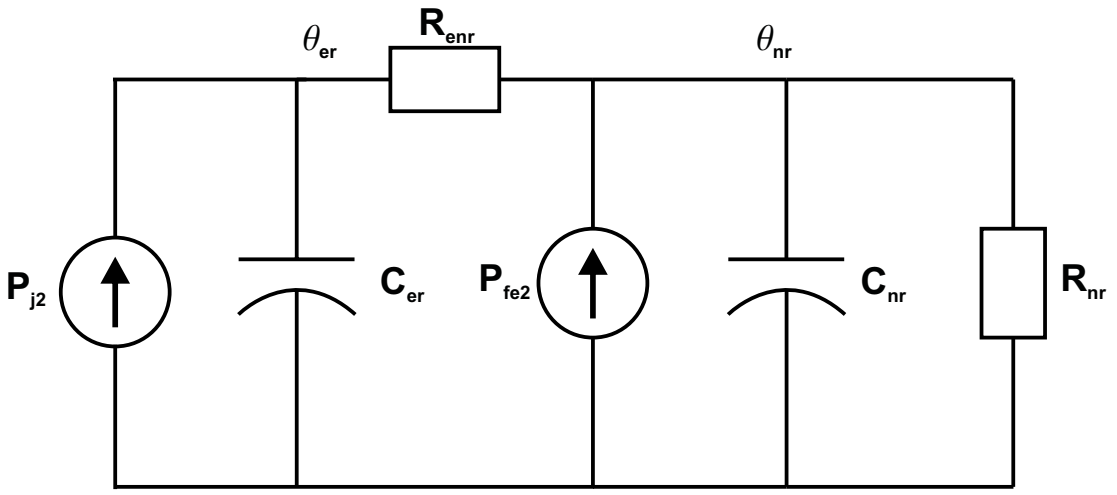


Figura 5.27: Circuito térmico do rotor da máquina de indução.

onde:

C_{ee} - Capacidade térmica do enrolamento de estator $[J/°C]$

C_{ne} - Capacidade térmica do núcleo de estator $[J/°C]$

C_{er} - Capacidade térmica do enrolamento de rotor $[J/°C]$

C_{nr} - Capacidade térmica do núcleo de rotor $[J/°C]$

R_{ene} - Resistência térmica entre o enrolamento e núcleo de estator $[°C/W]$

R_{ne} - Resistência térmica entre o núcleo de estator e o meio ambiente$[°C/W]$

R_{enr} - Resistência térmica entre o enrolamento e núcleo de rotor $[°C/W]$

R_{nr} - Resistência térmica entre o núcleo de rotor e o meio ambiente $[°C/W]$

P_{j_1} - Potência de perdas no cobre do estator $[W]$
P_{j_2} - Potência de perdas no cobre do rotor $[W]$
P_{fe_1} - Potência de perdas no ferro do estator $[W]$
P_{fe_2} - Potência de perdas no ferro do rotor $[W]$
θ_{ee} - Elevação de temperatura média no enrolamento de estator $[°C]$
θ_{ne} - Elevação de temperatura média no núcleo de estator $[°C]$
θ_{er} - Elevação de temperatura média no enrolamento de rotor $[°C]$
θ_{nr} - Elevação de temperatura média no núcleo de rotor $[°C]$

Por meio das Figuras 5.26 e 5.27 obtêm-se as equações do modelo térmico de estator e rotor, respectivamente; mostradas na sequência.

$$\frac{d\theta_{ee}}{dt} = \frac{1}{C_{ee}} \cdot \left[P_{j_1} - \frac{1}{R_{ene}} \cdot (\theta_{ee} - \theta_{ne}) \right] \tag{5.23}$$

$$\frac{d\theta_{ne}}{dt} = \frac{1}{C_{ne}} \cdot \left[P_{fe_1} + \frac{1}{R_{ene}} \cdot (\theta_{ee} - \theta_{ne}) - \frac{1}{R_{ne}} \cdot \theta_{ne} \right] \tag{5.24}$$

$$\frac{d\theta_{er}}{dt} = \frac{1}{C_{er}} \cdot \left[P_{j_2} - \frac{1}{R_{enr}} \cdot (\theta_{er} - \theta_{nr}) \right] \tag{5.25}$$

$$\frac{d\theta_{nr}}{dt} = \frac{1}{C_{nr}} \cdot \left[P_{fe_2} + \frac{1}{R_{enr}} \cdot (\theta_{er} - \theta_{nr}) - \frac{1}{R_{nr}} \cdot \theta_{nr} \right] \tag{5.26}$$

Como pode-se observar nos circuitos das Figuras 5.26 e 5.27, estes possuem seis elementos: duas fontes de corrente que modelam a potência de perdas no cobre do estator/rotor e a potência de perdas no ferro da máquina responsável pela produção de calor, duas capacitâncias que representam a capacidade de acumular calor nos enrolamentos e núcleos da máquina e duas resistências que modelam quão fácil ou difícil é a troca de calor entre os enrolamentos e o núcleo da máquina e entre o núcleo da máquina e o ambiente. As capacitâncias térmicas são calculadas pelas equações 5.27 - 5.30, utilizando o valor da massa da parte em questão e do calor específico da mesma.

$$C_{ee} = c_{ee} \cdot m_{ee} \tag{5.27}$$

$$C_{ne} = c_{ne} \cdot m_{ne} \tag{5.28}$$

$$C_{er} = c_{er} \cdot m_{er} \tag{5.29}$$

$$C_{nr} = c_{nr} \cdot m_{nr} \tag{5.30}$$

sendo:
c_{ee} - Calor específico do enrolamento de estator $[W/°C \cdot s \cdot Kg]$
c_{ne} - Calor específico do núcleo de rotor $[W/°C \cdot s \cdot Kg]$
c_{er} - Calor específico do enrolamento de estator $[W/°C \cdot s \cdot Kg]$
c_{nr} - Calor específico do núcleo de rotor $[W/°C \cdot s \cdot Kg]$
m_{ee} - Massa do enrolamento de estator $[Kg]$
m_{ne} - Massa do núcleo de rotor $[Kg]$
m_{er} - Massa do enrolamento de estator $[Kg]$
m_{nr} - Massa do núcleo de rotor $[Kg]$

A Tabela 5.12 apresenta as massas dos enrolamentos e núcleos de estator e rotor das máquinas candidatas ao acionamento dos manipuladores, necessárias para o cálculo das capacidades térmicas das mesmas.

Por meio das simulações dos acionamentos utilizando o modelo dinâmico das máquinas utilizadas e das equações 5.31 a 5.33, 5.37 e 5.38 são obtidas as potências de perdas das máquinas, as quais são necessárias para a utilização do modelo térmico. Para o cálculo das perdas, será levado em conta as perdas no cobre dos enrolamentos de estator, rotor e as perdas no ferro; neste trabalho, considerou-se que para uma máquina bem lubrificada as perdas por atrito e ventilação não são representativas. Portanto, calculam-se as perdas por meio das equações 5.31-5.38.

Tabela 5.12: Massas dos enrolamentos e núcleos de estator e rotor das máquinas candidatas ao acionamento dos manipuladores.

Motor	**Enrolamento de estator**$[Kg]$	**Núcleo de estator**$[Kg]$	**Enrolamento de rotor**$[Kg]$	**Núcleo de rotor**$[Kg]$
M1	0,747$^{(1)}$	1,871	0,180	0,890
M2	0,625$^{(1)}$	2,018	0,285	1,650
M3	0,814$^{(1)}$	3,150	0,364	2,550
M4	0,967$^{(1)}$	2,812	0,401	2,170
M5	0,503$^{(2)}$	5,150	0,574	3,980
M6	1,574$^{(1)}$	5,150	0,574	3,980
M7	2,393$^{(1)}$	6,726	0,724	6,374

Fonte: WEG.
onde:
$^{(1)}$ enrolamento em fio de cobre;
$^{(2)}$ enrolamento em fio de alumínio.

$$P_{j_1} = 3(r_s \cdot i_s^2) \tag{5.31}$$

$$P_{j_2} = 3(r_r \cdot i_r^2) \tag{5.32}$$

$$P_{fe} = 3(r_{fe} \cdot i_{fe}^2) \tag{5.33}$$

Na condição nominal, tem-se:

$$P_{j_1} = P_{j_{1n}} \tag{5.34}$$

$$P_{j_2} = P_{j_{2n}} \tag{5.35}$$

$$P_{fe} = P_{fe_n} \tag{5.36}$$

onde:

P_{j_1} - Potência de perdas no cobre do estator $[W]$

P_{j_2} - Potência de perdas no cobre do rotor $[W]$

P_{fe_1} - Potência de perdas no ferro do estator $[W]$

P_{fe_2} - Potência de perdas no ferro do rotor $[W]$
P_{j_1n} - Potência de perdas no cobre do estator em condições nominais $[W]$
P_{j_2n} - Potência de perdas no cobre do rotor em condições nominais $[W]$
P_{fe_1n} - Potência de perdas no ferro do estator em condições nominais $[W]$
P_{fe_2n} - Potência de perdas no ferro do rotor em condições nominais $[W]$

A separação das perdas no ferro do estator e do rotor pode ser feita utilizando um fator de separação de perdas, como apresentado nas equações 5.37 e 5.38 (Avolio, 1992).

$$P_{fe_1} = k_1 \cdot P_{fe_n} \tag{5.37}$$

$$P_{fe_2} = k_2 \cdot P_{fe_n} \tag{5.38}$$

onde:
$k_1 = k_2 = 0{,}5$, para o caso de alimentação senoidal;
$k_1 = 0{,}4$ e $k_2 = 0{,}6$, quando do suprimento não senoidal.

Desta forma, como a alimentação dos motores se dará por meio de conversores de frequência, sendo que a corrente na saída dos mesmos pode apresentar componentes harmônicas significativas, tem-se:

$$P_{fe_1} = 0{,}4 \cdot P_{fe_n} \tag{5.39}$$

$$P_{fe_2} = 0{,}6 \cdot P_{fe_n} \tag{5.40}$$

É necessário também estimar as resistências térmicas das máquinas que estão sendo estudadas. Este parâmetro depende da geometria da máquina e da velocidade de operação, para motores autoventilados e, como este parâmetro não é disponibilizado nos catálogos dos fabricantes de motores, para estimá-los são utilizados dados de catálogos, normas e informações técnicas fornecidas pelo fabricante.

5.6.1 Cálculo das resistências do circuito térmico de estator

Fazendo uma análise no circuito que representa o modelo térmico de estator, apresentado em 5.26, tem-se:

$$R_{ene} = \frac{\theta_{ee} - \theta_{ne}}{P_{j_1}} \tag{5.41}$$

Conforme já apresentado por Avolio (1992), a diferença de temperatura entre o enrolamento e o núcleo do estator, em condições nominais e em regime permanente, é igual à diferença entre a temperatura do ponto mais quente do enrolamento e a temperatura média do mesmo, que podem ser obtidos na Tabela 5.13. Assim, a Equação 5.41 pode ser reescrita como mostra a Equação 5.42.

$$R_{ene} = \frac{\Delta\theta_e}{P_{j_1 n}} \tag{5.42}$$

Tabela 5.13: Temperaturas admissíveis para os enrolamentos de estator em função da classe de isolamento.

Classe de isolamento	**A**	**E**	**B**	**F**	**H**
Elevação de temperatura média admissível, calculada pelo método da resistência [$°C$]	60	75	80	100	125
Diferença de temperatura entre o ponto mais quente e a temperatura média [$°C$]	5	5	10	10	15
Temperatura ambiente [$°C$]	40	40	40	40	40
Temperatura admissível do ponto mais quente [$°C$]	105	120	130	155	180

Fonte: ABNT (2003).

De forma similar, partindo para o núcleo de estator, e fazendo uma análise no circuito que representa o modelo térmico de estator apresentado em 5.26, tem-se:

$$R_{ne} = \frac{\theta_{ne}}{P_{j_1} + P_{fe_1}} \tag{5.43}$$

Sendo que a temperatura do núcleo em regime permanente para condições nominais de operação, é dada pela equação 5.44:

$$\theta_{ne} = \theta_{isol} - \Delta\theta_e \tag{5.44}$$

Desta forma, a equação 5.43 pode ser reescrita como a equação 5.45.

$$R_{ne} = \frac{\theta_{isol} - \Delta\theta_e}{P_{j_1} + P_{fe_1}} \tag{5.45}$$

5.6.2 Cálculo das resistências do circuito térmico de rotor

Assim como foi realizado para o circuito térmico de estator, fazendo-se uma análise no circuito que representa o modelo térmico de rotor, apresentado em 5.27, tem-se:

$$R_{enr} = \frac{\theta_{er} - \theta_{nr}}{P_{j_2}} \tag{5.46}$$

Assim como apresentado na Equação 5.47, a diferença de temperatura entre o enrolamento e o núcleo de rotor é admitida como sendo a diferença entre as elevações de temperatura admissíveis para os enrolamentos e núcleo de rotor, apresentadas nas Tabelas 5.14 e 5.15, fazendo com que a Equação 5.46 possa ser reescrita como apresentado em 5.48.

$$\Delta\theta_r = \theta_{adm1} - \theta_{adm2} \tag{5.47}$$

Tabela 5.14: Elevações de temperatura admissíveis para os enrolamentos do rotor em gaiola, em função da classe de isolamento, medidos pelo método da resistência.

Classe de isolamento	**A**	**B**
Elevação de temperatura no enrolamento do rotor em gaiola de máquinas de indução [$°C$]	65	90

Fonte: Kostenko e Piotrovskij (1969).

$$R_{enr} = \frac{\Delta\theta_r}{P_{j_2 n}} \tag{5.48}$$

Tabela 5.15: Elevações de temperatura admissíveis para o núcleo magnético do rotor e outras partes em contato com o enrolamento, em função da classe de isolamento, medidos pelo método do termômetro.

Classe de isolamento	**A**	**E**	**B**	**F**	**H**
Núcleo magnético e outras partes em contato com os enrolamentos [$°C$]	60	75	80	100	125

Fonte: ABNT (2003).

Para o cálculo da última resistência térmica necessária para o modelo térmico, faz-se como apresentado por Avolio (1992). Utiliza-se o valor admissível de elevação de temperatura para o núcleo de rotor e as equações 5.25 e 5.26 em regime permanente, obtendo a Equação 5.49.

$$R_{nr} = \frac{\theta_{nr}}{P_{j_2} + P_{fe_2}} \tag{5.49}$$

Para a condição nominal, a elevação de temperatura do núcleo do rotor é suposta como sendo igual à elevação de temperatura admissível para o núcleo de rotor, cujo valor está disponível na Tabela 5.15. Assim, tem-se:

$$R_{nr} = \frac{\theta_{adm2}}{P_{j_2} + P_{fe_2}} \tag{5.50}$$

Desta forma, são obtidas as resistências das máquinas candidatas ao acionamento dos manipuladores robóticos, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.16.

Tabela 5.16: Resistências térmicas das máquinas candidatas ao acionamento dos manipuladores.

Motor	$\mathbf{R}_{ene}[°C/W]$	$\mathbf{R}_{ne}[°C/W]$	$\mathbf{R}_{enr}[°C/W]$	$\mathbf{R}_{nr}[°C/W]$
M1	0,1897	0,8446	1,1076	1,4744
M2	0,1817	0,7769	0,7826	1,2239
M3	0,1359	0,6519	0,5147	1,1408
M4	0,1207	0,5424	0,3411	0,8114
M5	0,0652	0,3575	0,2084	0,7165
M6	0,0467	0,2960	0,1697	0,9871
M7	0,0695	0,3711	0,1644	0,6261

5.6.3 Correção das resistências térmicas em função da velocidade de operação da máquina

Como já dito anteriormente e apresentado por Silva (2014), o sistema de resfriamento de motores autoventilados se dá por meio de um ventilador acoplado ao eixo de carga. Desta forma, a vazão de ar em ventiladores é proporcional à velocidade destes, e, assim, operando à frequência fixa e nominal, a taxa de remoção de calor é constante. Os valores de resistências térmicas que foram calculados anteriormente são para esta condição e não levam em consideração a alteração na velocidade da máquina.

Entretanto, quando se opera motores autoventilados em velocidades inferiores à nominal, seu resfriamento fica comprometido, fazendo com que a transmissão de calor do mesmo para o ambiente seja prejudicada. Para considerar esta característica de ventilação no modelo, Avolio (1992) apresenta a equação de um fator de correção das resistências térmicas em função da velocidade de operação da máquina, proposto por de Sá (1989) para a correção das resistências térmicas que representam a transmissão de calor dos núcleos de estator e rotor para o ambiente. Tal fator de correção é mostrado na Equação 5.51, onde:

$$k_v = \left[0{,}3 + 0{,}7 \cdot \left(\frac{\omega_m}{\omega_n}\right)^{0{,}7}\right]^{-1} \tag{5.51}$$

k_v - Fator de correção das resistências térmicas da máquina de indução em função da velocidade de operação e da velocidade nominal da mesma;
ω_m - Velocidade de operação da máquina de indução;
ω_n - Velocidade nominal de operação da máquina de indução.

Assim, as resistências térmicas que representam a transmissão de calor dos núcleos de estator e rotor para o ambiente, depois da correção, são dadas pelas equações 5.52 e 5.53.

$$R_{ne} = k_v \cdot R_{ne} \tag{5.52}$$

$$R_{nr} = k_v \cdot R_{nr} \tag{5.53}$$

Por fim, na Figura 5.28 é apresentado o valor do fator de correção k_v em função da relação entre as velocidades de operação e nominal da máquina.

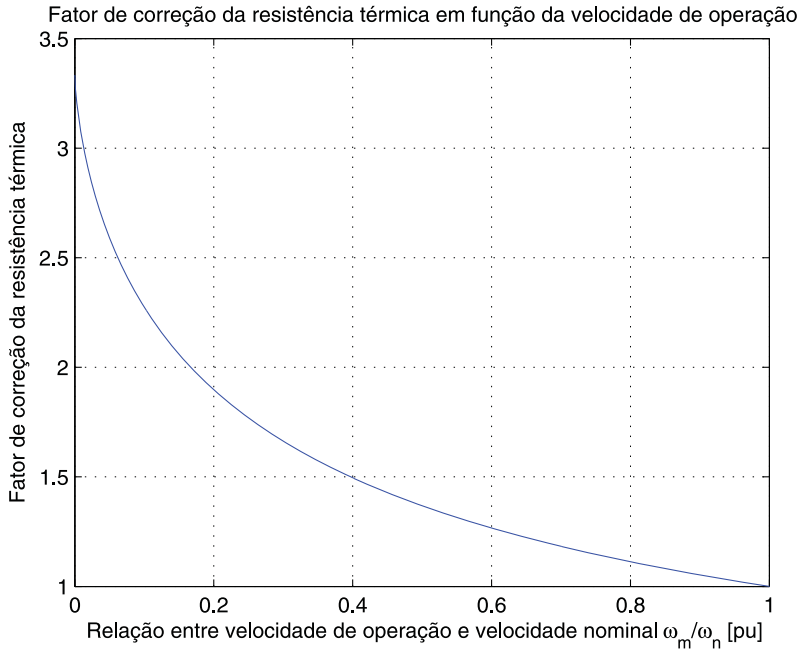


Figura 5.28: Fator de correção das resistências térmicas da máquina de indução em função da velocidade de operação e da velocidade nominal da mesma.

Como a operação dos manipuladores robóticos se dará por meio de conversores de frequência, a tensão de alimentação das máquinas possuem harmônicos, fazendo com que as perdas no ferro sejam aumentadas. IEC (2006) exemplifica o aumento das perdas no do motor devido ao uso de conversores de frequência com o caso prático de um motor com carcaça 315, com valores nominais de torque e velocidade. Ao analisar este estudo de caso percebe-se um aumento de 48% nas perdas no ferro. Neste trabalho, foi considerado nas simulações este acréscimo de perdas no ferro para representar o uso do conversor de frequência.

Empregando-se a metodologia de cálculo de temperatura, para as trajetórias e ciclos de trabalho utilizados, as temperaturas de regime das máquinas candidatas foram sempre superiores às máximas elevações de temperaturas admissíveis para a classe de isolamento das mesmas. Nas Tabelas

5.17 - 5.20 são apresentados os menores valores de tempo que cada uma das máquinas candidatas levariam para ultrapassar a máxima elevação de temperatura admissível para a classe de isolamento das mesmas para os enrolamentos e núcleos de estator ou rotor, para cada uma das 8 trajetórias utilizadas.

Tabela 5.17: Tempo para ultrapassar o valor de elevação de temperatura admissível pelas máquinas candidatas ao acionamento da Junta 1.

Motor	**Tempo [min]**							
	T1	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**
M1	40,5	38,7	32,3	18,6	26,5	41,6	31,9	13,4
M2	77,8	66,6	52,6	51,5	66,2	75,8	47,9	24,6
M3	72,4	68,6	60,6	78,8	98,5	72,6	60,2	57,6
M4	73,9	71,9	63,5	X(1)	X(1)	77,5	69,6	X(1)
M5	43,5	44,1	41,8	46,1	55,6	46,0	46,9	64,6
M6	25,6	25,9	25,0	26,0	29,0	26,6	27,2	31,4
M7	66,4	67,6	64,4	66,7	79,2	70,4	72,5	88,1

Tabela 5.18: Tempo para ultrapassar o valor de elevação de temperatura admissível pelas máquinas candidatas ao acionamento da Junta 2.

Motor	**Tempo [min]**							
	T1	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**
M1	56,9	59,1	64,2	61,5	72,1	64,6	64,4	78,8
M2	67,9	71,0	80,6	76,2	109,7	84,0	95,0	X(1)
M3	55,8	57,8	60,3	56,7	63,7	60,7	66,4	67,2
M4	55,0	57,9	60,5	54,5	62,8	60,4	69,2	66,5
M5	40,0	42,2	42,4	37,7	40,7	41,3	45,2	40,8
M6	24,7	25,7	25,6	23,5	24,6	25,1	26,5	24,5
M7	63,9	67,7	67,3	59,3	63,2	65,0	70,6	62,7

Tabela 5.19: Tempo para ultrapassar o valor de elevação de temperatura admissível pelas máquinas candidatas ao acionamento da Junta 3.

Motor	**Tempo [min]**							
	T1	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**
M1	63,1	66,6	57,2	84,5	79,4	63,7	59,2	99,8
M2	64,4	69,6	58,0	81,1	76,1	62,6	60,0	93,1
M3	53,9	56,9	50,7	57,5	55,8	51,8	51,5	58,9
M4	52,2	56,3	48,4	54,8	52,7	48,9	49,1	55,5
M5	38,1	41,1	35,8	37,5	36,2	35,1	35,8	36,7
M6	23,8	25,2	22,7	23,3	22,7	22,3	22,7	22,8
M7	59,9	64,9	56,2	57,8	55,6	54,5	56,0	55,9

Tabela 5.20: Tempo para ultrapassar o valor de elevação de temperatura admissível pelas máquinas candidatas ao acionamento da Junta 4.

Motor	**Tempo [min]**							
	T1	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**
M1	58,5	62,6	84,9	124,2	156,5	97,6	91,1	118,1
M2	59,3	65,0	109,7	X(1)	X(1)	136,1	121,7	X(1)
M3	50,6	54,0	75,1	83,8	86,2	77,7	76,3	83,7
M4	49,3	53,6	89,3	107,2	112,7	93,3	91,0	107,3
M5	35,8	38,8	64,0	68,0	68,2	63,6	63,4	68,5
M6	22,7	24,1	33,8	34,6	34,5	33,4	33,5	34,8
M7	56,4	61,2	106,5	111,5	111,1	104,4	104,6	112,7

onde:
(1) a máquina não atingiu a máxima elevação de temperatura admissível para a classe de isolamento da mesma.

Por fim, resume-se os dados apresentados nas Tabelas 5.17 - 5.20, apresentando na Tabela 5.21 o menor valor de tempo que cada uma das máquinas candidatas levariam para ultrapassar a máxima elevação de temperatura admissível para a classe de isolamento das mesmas, para os enrolamentos e núcleos de estator ou rotor, para as 8 trajetórias utilizadas.

Tabela 5.21: Menor tempo para ultrapassar o valor de elevação de temperatura admissível pelas máquinas candidatas ao acionamento dos manipuladores robóticos.

Motor	**Tempo [min]**			
	Junta 1	**Junta 2**	**Junta 3**	**Junta 4**
M1	13,4	56,9	57,2	58,5
M2	24,6	67,9	58,0	59,3
M3	57,6	55,8	50,7	50,6
M4	63,5	54,5	48,4	49,3
M5	41,8	37,7	35,1	35,8
M6	25,0	23,5	22,3	22,7
M7	64,4	59,3	54,5	56,4

Ao analisar os dados obtidos nesta seção e apresentados nas Tabelas 5.17 - 5.21, percebe-se que todas as máquinas, em um determinado tempo, ultrapassariam o valor de elevação de temperatura admissível para a sua classe de isolamento. O fato das máquinas operarem com torques que chegam até a ultrapassar o torque nominal das mesmas juntamente à sua operação em baixas velocidades, são os responsáveis por este resultado. Desta forma, as máquinas que são especificadas neste trabalho poderão apenas operar

de forma contínua e com carga nominal por um determinado período de tempo. Caso seja necessário operá-las por mais tempo, estas terão que possuir ventilação forçada. Para auxiliar na escolha das máquinas candidatas, foram calculadas também as energias consumidas pelas mesmas em uma repetição das trajetórias utilizadas. Esta análise será apresentada na próxima seção.

5.7 Avaliação da energia consumida pelas máquinas candidatas

Por fim, é utilizado um critério de energia consumida para chegar a uma conclusão final a respeito dos motores a serem escolhidos para cada uma das juntas do manipulador robótico. Neste critério, para cada uma das juntas, os motores candidatos que ainda sejam considerados adequados depois das avaliações realizadas nos critérios antecedentes, têm listadas as energias consumidas em uma repetição das trajetórias utilizadas, sendo que o motor que tiver o menor consumo será escolhido. Para esta análise, foi calculada a energia consumida por cada motor para cada trajetória proposta, a partir da equação 5.54.

$$E\left(t\right) = \int_0^t \frac{3}{2}\left(v_{sd}\left(t\right) i_{sd}\left(t\right) + v_{sq}\left(t\right) i_{sq}\left(t\right)\right) dt \tag{5.54}$$

Desta forma, foi utilizado o critério de energia consumida para chegar a uma conclusão final a respeito dos motores a serem escolhidos para cada uma das juntas do manipulador robótico. Os valores de energia consumida obtidos são apresentados nas Tabelas 5.22 - 5.25, referentes às juntas 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Por fim, por meio dos dados apresentados nessas tabelas, são calculados os consumos médios por junta e máquina, além do seu consumo médio total; os dados obtidos mostrados na Tabela 5.26.

Tabela 5.22: Energia consumida em uma repetição das trajetórias utilizadas pelas máquinas candidatas ao acionamento da Junta 1.

Motor	**Energia Consumida [J]**							
	T1	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**
M1	1495,04	1612,19	1761,60	2443,06	2008,92	1564,47	1753,83	3010,91
M2	1225,26	1378,49	1502,22	2258,41	1861,75	1337,50	1557,52	2925,72
M3	1486,06	1612,39	1735,36	2342,98	1978,53	1582,84	1755,14	2915,94
M4	1629,39	1722,55	1857,37	2375,36	2002,72	1688,74	1820,84	2827,10
M5	3065,60	3082,40	3186,62	3549,83	2988,37	3027,08	2991,47	3640,73
M6	4499,17	4495,51	4578,29	4973,40	4260,07	4417,81	4267,47	4657,03
M7	2925,19	2930,24	3036,64	3349,91	2799,55	2871,75	2817,16	3372,78

Tabela 5.23: Energia consumida em uma repetição das trajetórias utilizadas pelas máquinas candidatas ao acionamento da Junta 2.

Motor	**Energia Consumida [J]**							
	T1	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**
M1	977,92	952,01	968,29	1046,87	1103,95	1029,23	1070,93	1046,82
M2	955,71	928,77	940,22	1021,86	1069,34	995,34	1026,45	1101,17
M3	1405,79	1361,11	1372,09	1496,22	1485,25	1431,24	1387,30	1504,13
M4	1552,64	1488,09	1504,48	1675,37	1641,35	1575,56	1494,24	1659,64
M5	2955,49	2807,60	2855,15	3220,73	3122,95	2988,26	2790,62	3173,66
M6	4362,92	4178,01	4239,58	4691,19	4564,18	4399,28	4160,91	4630,33
M7	2814,51	2661,81	2710,29	3087,26	2981,99	2844,79	2638,10	3031,80

Tabela 5.24: Energia consumida em uma repetição das trajetórias utilizadas pelas máquinas candidatas ao acionamento da Junta 3.

Motor	**Energia Consumida [J]**							
	T1	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**
M1	935,59	910,32	971,64	997,07	1052,72	981,04	1019,05	1081,43
M2	1000,14	959,18	1046,16	1058,27	1120,39	1062,46	1088,99	1131,22
M3	1460,54	1394,56	1523,94	1528,86	1599,98	1554,37	1565,03	1603,38
M4	1631,48	1536,70	1716,63	1720,90	1806,70	1764,48	1760,74	1810,07
M5	3102,96	2892,92	3276,07	3286,73	3434,27	3395,19	3336,37	3450,30
M6	4552,83	4290,09	4765,71	4779,42	4954,76	4917,58	4832,97	4976,24
M7	3005,18	2782,42	3187,20	3198,33	3351,16	3314,87	3247,68	3367,41

5.8 Síntese dos resultados

Após analisar as informações obtidas ao longo de cada uma das avaliações realizadas e retirando-se da análise as máquinas que foram consideradas não adequadas, foram selecionadas três máquinas candidatas para cada uma das juntas, sendo selecionadas as três que poderiam funcionar pelo maior tempo até ultrapassar o valor de elevação de temperatura admissível pela classe de isolação das mesmas. Nas Tabelas 5.27 - 5.30 são

Tabela 5.25: Energia consumida em uma repetição das trajetórias utilizadas pelas máquinas candidatas ao acionamento da Junta 4.

Motor	**Energia Consumida [J]**							
	T1	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**
M1	968,34	993,00	710,23	735,61	708,14	752,87	707,82	726,29
M2	1041,10	1046,94	691,39	711,62	682,79	734,41	688,82	699,44
M3	1538,14	1513,74	1022,18	1038,21	1010,06	1069,21	1022,47	1022,81
M4	1698,56	1646,50	1032,09	1045,47	1019,87	1083,15	1036,39	1028,04
M5	3277,27	3102,02	1878,10	1885,12	1868,82	1955,11	1902,25	1858,15
M6	4777,64	4545,03	3043,08	3046,60	3035,65	3131,57	3076,77	3016,09
M7	3175,70	2988,15	1710,32	1715,71	1701,58	1789,45	1736,73	1689,04

Tabela 5.26: Energia média consumida em uma repetição das trajetórias utilizadas pelas máquinas candidatas ao acionamento dos manipuladores robóticos.

Motor	**Energia Consumida Média [J]**				
	Junta 1	**Junta 2**	**Junta 3**	**Junta 4**	**Total**
M1	1956,25	1024,50	993,61	787,79	4762,15
M2	1755,86	1004,86	1058,35	787,06	4606,13
M3	1926,16	1430,39	1528,83	1154,60	6039,98
M4	1990,51	1573,92	1718,46	1198,76	6481,65
M5	3191,51	2989,31	3271,85	2215,86	11668,53
M6	4518,59	4403,30	4758,70	3459,05	17139,64
M7	3012,90	2846,32	3181,78	2063,34	11104,34

apresentadas estas máquinas e, de forma resumida, seu tempo de funcionamento contínuo até que essas ultrapassem o valor de elevação de temperatura admissível por suas classes de isolação, a energia média consumida em uma repetição das trajetórias utilizadas, a relação de transmissão "i" e o número de estágios necessários para que as mesmas possam acionar suas respectivas juntas.

Tabela 5.27: Síntese dos resultados para a Junta 1

Motor	Tempo [min]	Energia [J]	Relação de transmissão "i"	Número de estágios da transmissão
M3	57,6	1926,16	88,3	3
M4	63,5	1990,51	59,7	3
M7	64,4	3012,90	19,9	2

Após analisar os dados das tabelas é possível especificar uma máquina e sua respectiva relação de transmissão para cada uma das quatro juntas dos manipuladores robóticos.

Pode-se perceber que os tempos de funcionamento contínuo até que essas

Tabela 5.28: Síntese dos resultados para a Junta 2

Motor	Tempo [min]	Energia [J]	Relação de transmissão "i"	Número de estágios da transmissão
M1	56,9	1024,50	100,0	3
M2	67,9	1004,86	79,7	3
M7	59,3	2846,32	12,9	2

Tabela 5.29: Síntese dos resultados para a Junta 3

Motor	Tempo [min]	Energia [J]	Relação de transmissão "i"	Número de estágios da transmissão
M1	57,2	993,61	38,0	3
M2	58,0	1058,35	26,1	3
M7	54,5	3181,78	4,1	1

Tabela 5.30: Síntese dos resultados para a Junta 4

Motor	Tempo [min]	Energia [J]	Relação de transmissão "i"	Número de estágios da transmissão
M1	58,5	787,79	59,7	3
M2	59,3	787,06	41,3	3
M7	56,4	2063,34	6,7	2

ultrapassem o valor de elevação de temperatura admissível por suas classes de isolação são bem próximos; desta forma, a escolha final pela máquina que acionará cada junta se dará por meio da relação de transmissão, número de estágios desta e energia consumida em uma repetição das trajetórias utilizadas.

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, percebeu-se que quanto maior for a relação de transmissão, maior é o número de estágios da mesma e mais difícil se torna sua implementação; assim, a máquina especificada para cada uma das juntas será aquela que, para um mesmo tempo de funcionamento contínuo, possui o menor valor de relação de transmissão, mesmo que isso leve a um maior consumo de energia.

Nas Tabelas 5.31 - 5.34 apresenta-se os elementos de potência especificados para cada uma das juntas dos manipuladores robóticos. Já nas Figuras 5.29 - 5.32 são apresentadas as velocidades angulares mecânicas de referência, as velocidades desenvolvidas pelas máquinas especificadas e o erro de rastreamento de trajetória para cada uma das 4 juntas dos manipuladores

para uma das trajetórias simuladas.

Tabela 5.31: Elementos de potência especificados para a Junta 1 dos manipuladores robóticos.

EQUIPAMENTO	ESPECIFICAÇÃO
Máquina de indução	Rotor em gaiola, trifásica, 8 polos, 1,5CV, 220/380V, 60Hz, 6,04/3,50A, 855 rpm, fixação pela base, carcaça 100L, categoria N, fator de serviço 1,15, classe de isolação F (ΔT 80K), grau de proteção IP55,autoventilado.
Transmissão mecânica	Relação total de 19,9:1 implementada em dois estágios. Primeiro estágio com polias e correia, relação de 5:1. Segundo estágio com polias e cabos de aço, relação de 3,98:1.

Tabela 5.32: Elementos de potência especificados para a Junta 2 dos manipuladores robóticos.

EQUIPAMENTO	ESPECIFICAÇÃO
Máquina de indução	Rotor em gaiola, trifásica, 8 polos, 1,5CV, 220/380V, 60Hz, 6,04/3,50A, 855 rpm, fixação pela base, carcaça 100L, categoria N, fator de serviço 1,15, classe de isolação F (ΔT 80K), grau de proteção IP55,autoventilado.
Transmissão mecânica	Relação total de 12,9:1 implementada em dois estágios. Primeiro estágio com polias e correia, relação de 5:1. Segundo estágio com polias e cabos de aço, relação de 2,58:1.

Tabela 5.33: Elementos de potência especificados para a Junta 3 dos manipuladores robóticos.

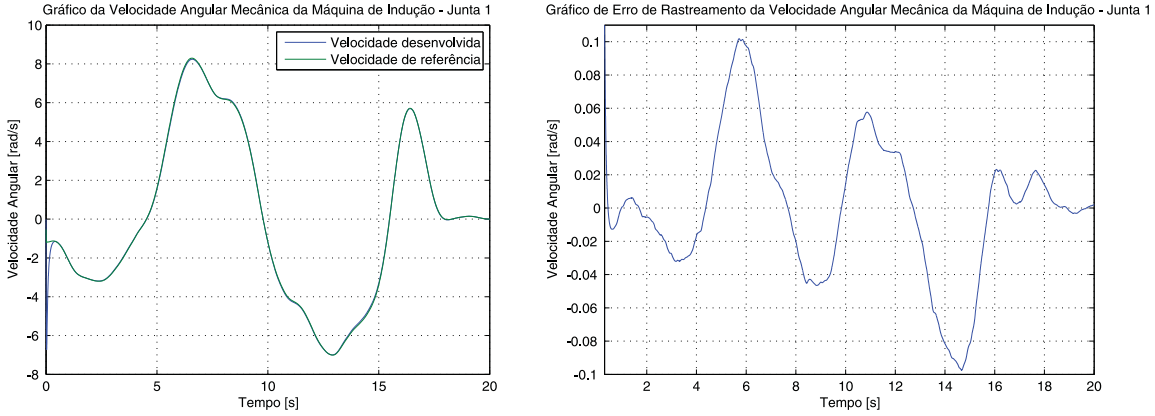
EQUIPAMENTO	ESPECIFICAÇÃO
Máquina de indução	Rotor em gaiola, trifásica, 8 polos, 1,5CV, 220/380V, 60Hz, 6,04/3,50A, 855 rpm, fixação pela base, carcaça 100L, categoria N, fator de serviço 1,15, classe de isolação F (ΔT 80K), grau de proteção IP55,autoventilado.
Transmissão mecânica	Relação total de 4,1:1 implementada em um estágio. Estágio único com polias e cabos de aço, relação de 4,1:1.

5.9 Especificação dos conversores de frequência

Após a especificação dos motores foi realizada então a especificação dos conversores de frequência.

Tabela 5.34: Elementos de potência especificados para a Junta 4 dos manipuladores robóticos.

EQUIPAMENTO	ESPECIFICAÇÃO
Máquina de indução	Rotor em gaiola, trifásica, 8 polos, 1,5CV, 220/380V, 60Hz, 6,04/3,50A, 855 rpm, fixação pela base, carcaça 100L, categoria N, fator de serviço 1,15, classe de isolação F (ΔT 80K), grau de proteção IP55,autoventilado.
Transmissão mecânica	Relação total de 6,7:1 implementada em dois estágios. Primeiro estágio com polias e correia, relação de 5:1. Segundo estágio com polias e cabos de aço, relação de 1,34:1.



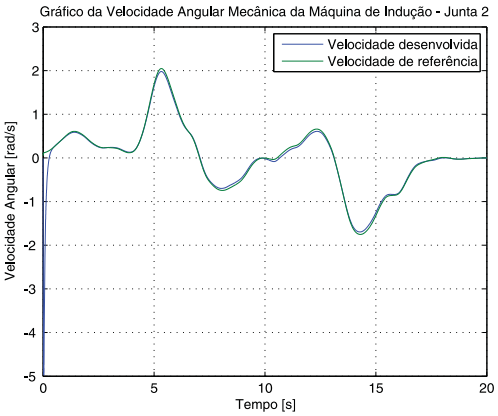
(a) Tempo x Velocidade angular mecânica de referência e Velocidade angular mecânica desenvolvida pela máquina de indução especificada para a Junta 1.

(b) Tempo x Erro de rastreamento de trajetória para a máquina de indução especificada para a Junta 1.

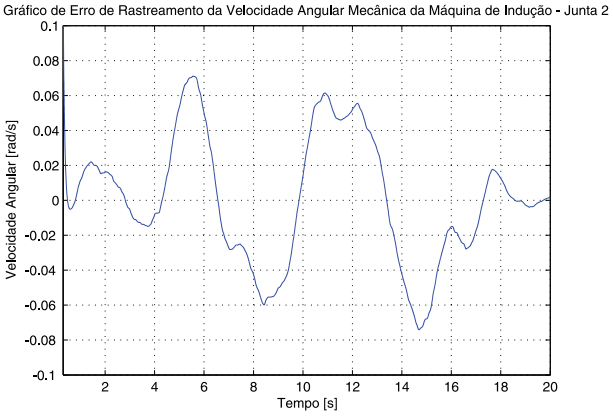
Figura 5.29: Gráficos de velocidade angular mecânica de referência, velocidade angular mecânica desenvolvida e erro de rastreamento de trajetória para a máquina de indução especificada para a Junta 1.

A especificação de um conversor de frequência deve contemplar uma gama de critérios importantes para que o mesmo seja adequado à aplicação à qual se destina, como, por exemplo: tensão e frequência de entrada e saída, corrente nominal, capacidade de sobrecarga, tipo de controle, número de entradas e saídas analógicas e digitais, características do ambiente onde o mesmo será instalado, etc.

Para a operação dos manipuladores robóticos em questão, são necessários conversores de frequência com capacidade para operação com controle vetorial, que possuam no mínimo duas entradas e duas saídas analógicas, no mínimo duas entradas e duas saídas digitais, módulo para encoder (expan-

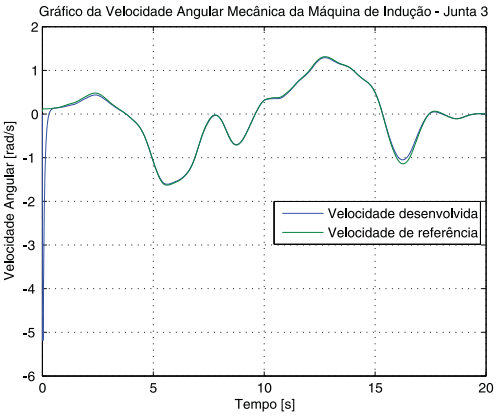


(a) Tempo x Velocidade angular mecânica de referência e Velocidade angular mecânica desenvolvida pela máquina de indução especificada para a Junta 2.

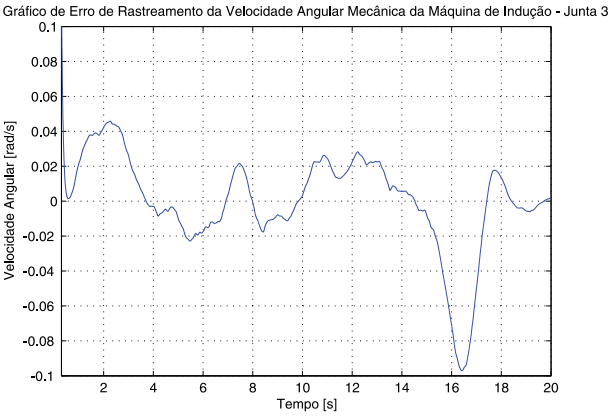


(b) Tempo x Erro de rastreamento de trajetória para a máquina de indução especificada para a Junta 2.

Figura 5.30: Gráficos de velocidade angular mecânica de referência, velocidade angular mecânica desenvolvida e erro de rastreamento de trajetória para a máquina de indução especificada para a Junta 2.



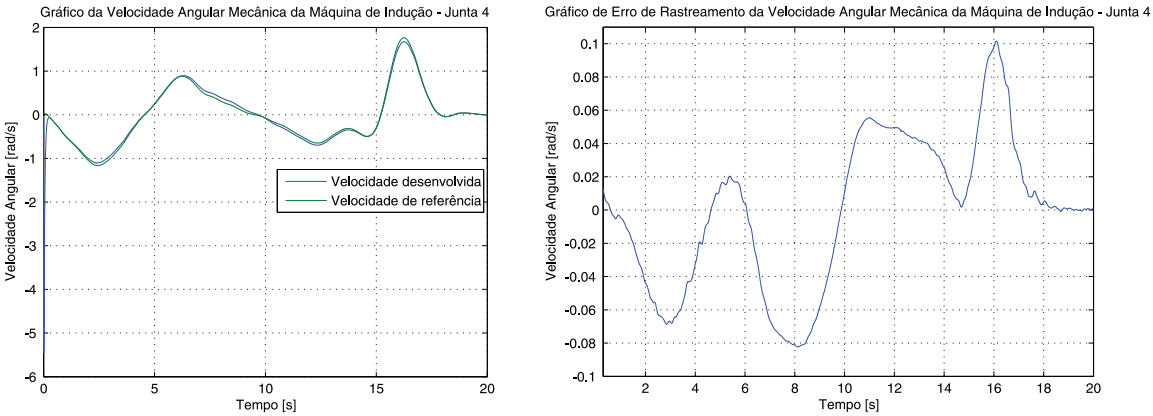
(a) Tempo x Velocidade angular mecânica de referência e Velocidade angular mecânica desenvolvida pela máquina de indução especificada para a Junta 3.



(b) Tempo x Erro de rastreamento de trajetória para a máquina de indução especificada para a Junta 3.

Figura 5.31: Gráficos de velocidade angular mecânica de referência, velocidade angular mecânica desenvolvida e erro de rastreamento de trajetória para a máquina de indução especificada para a Junta 3.

são de funções) ENC-02 incluído, IHM inclusa, etc. Foram especificados então os conversores de frequência para os manipuladores robóticos. Os conversores especificados e que são utilizados neste trabalho são da família CFW11 da WEG e possuem controle vetorial de torque e velocidade com alta resposta dinâmica; a especificação técnica dos mesmos é apresentada



(a) Tempo x Velocidade angular mecânica de referência e Velocidade angular mecânica desenvolvida pela máquina de indução especificada para a Junta 4.

(b) Tempo x Erro de rastreamento de trajetória para a máquina de indução especificada para a Junta 4.

Figura 5.32: Gráficos de velocidade angular mecânica de referência, velocidade angular mecânica desenvolvida e erro de rastreamento de trajetória para a máquina de indução especificada para a Junta 4.

de forma resumida na Tabela 5.35.

Para o suprimento dos conversores, foi seguida a recomendação presente no capítulo 3 do manual da família de conversores CFW11 do fabricante WEG, "Instalação e Conexão", realizando pequenas alterações que se fizeram necessárias à aplicação. A Figura 5.33 ilustra como foi realizada a alimentação dos mesmos.

Conforme descrito em WEG (2005), a instalação de um contator na alimentação do conversor previne uma possível partida automática do motor após uma interrupção de energia; além disso, o mesmo também permite um seccionamento remoto da rede elétrica que alimenta o conversor. Com o objetivo de proteger o usuário dos manipuladores robóticos caso alguma situação não prevista aconteça e os manipuladores se comportem de maneira inadequada, foram instalados contatores na alimentação dos conversores, como recomendado pelo Guia de Aplicação de Inversores da WEG, e por meio de um botão cogumelo (tipo soco) à impulsão, instalado próximo ao usuário, o qual pode interromper a alimentação dos conversores. Mais detalhes de como isto foi realizado podem ser vistos nos diagramas de comando e força apresentados no Apêndice A, Seções A.1 e A.2.

Tabela 5.35: Especificação técnica dos conversores de frequência utilizados nos manipuladores robóticos.

CFW11				
Tensão de alimentação de entrada	Monofásica e trifásica	Corrente nominal de saída	JUNTA 1	200-240 V / 50/60 Hz/ 7A ND -7A HD
			JUNTA 2	
			JUNTA 3	
			JUNTA 4	
		Máximo motor aplicável	JUNTA 1	200-240V / 50/60 Hz/ 2,0CV (1,5kW)
			JUNTA 2	
			JUNTA 3	
			JUNTA 4	
Controle	Método		Tipos de controle: V/F (Escalar), VVW (Voltage Vector WEG): controle vetorial de tensão, controle vetorial com encoder, controle vetorial sensorless (sem encoder), vetorial WMagnet com encoder e sensorless; Tensão imposta,PWM SVM (Space Vector Modulation); Reguladores de corrente, fluxo e velocidade em software (totalmente digital)	
	Entradas digitais: 6, bidirecionais isoladas, 24 V CC, funções programáveis			
	Saídas digitais: 3 x relé com contato reversor (240 V/1 A)			
	Entradas analógicas: 1 (-10 a +10 V CC ou 0/4 a 20 mA) 11 bits + sinal ; 1 (0 a 10 V ou 0/4 a 20 mA) 12 bits			
	Saídas analógicas: 2 isoladas (0 a 10 V ou 0/4 a 20 mA) 11 bits			
	Expansão de funções		Entradas e saídas: slot 1	
			Redes de comunicação: WEG (slot 3): CAN (CANopen; DeviceNet); Profibus-DP; RS232 e RS485 (Modbus); Anybus-CC (slot 4): DeviceNet; Profibus-DP; Ethernet-IP; RS232 e RS485 (Modbus)	
			Entrada de encoder incremental: slot 2	
			PLC11 (01 ou 02): slots 1,2 ou 3	
	Capacidade da fonte: 24 V CC (+/- 20%), 500 mA			
Ambiente	Temperatura de operação		-10-50°C	
	Grau de proteção		NEMA1	
	Altitude		2.000 m (para tensão nominal de 200-480 V)	
Software	WEG ladder programmer -WLP SuperDrive G2 comfunção Trace Função SoftPLC			
Conexão com computador	Interface USB incorporada no produto padrão (comunicação com softwares WLP e Superdrive) Conector USB standard Rev. 2.0 (basic speed), plug tipo B; Cabo de interconexão blindado			
Interface de operação (IHM)	Permite acesso/alteração de todos os parâmetros, Display LCD gráfico com backlight Possibilidade de montagem externa.			
Modos de frenagem	Reostática			
	Optimal braking			
	CC			
Acessórios inclusos	Referência: ENC-02		Módulo de encoder incremental 5 a 12 V CC, 100kHz	
Código de referência do produto	CFW110007B2SZ + ENC-02			

5.9.1 Proteção

Para a proteção dos conversores contra curto-circuitos, foram especificados fusíveis do tipo aR (Ultra-Rápidos), seguindo o Guia de fusíveis recomendados para conversores CFW11 WEG (2001). No mesmo, a partir do código de referência do conversor utilizado e sua mecânica, obtém-se os

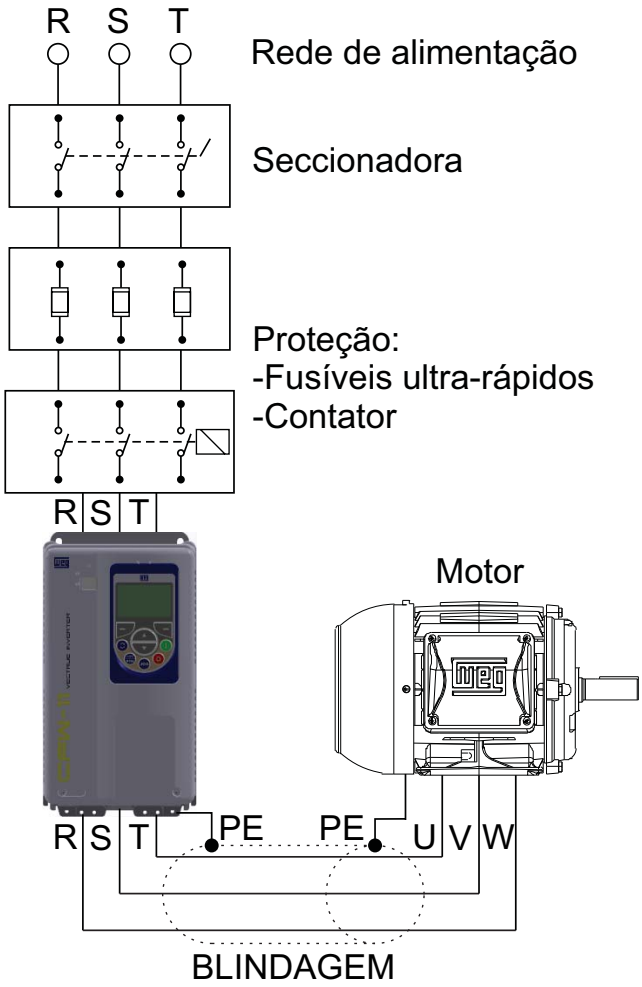


Figura 5.33: Conexões de potência e aterramento de um conversor de frequência CFW11 da WEG.
Fonte: adaptado de (WEG, 2013).

dados de máximo I^2t do fusível, tamanho, corrente nominal e tipo. Assim, na Tabela 5.36 são apresentadas as características dos fusíveis especificados.

Tabela 5.36: Fusíveis especificados para proteção dos conversores de frequência utilizados contra curto-circuito.

CFW-11		**Máximo I^2t do fusível**	**Fusível aR Recomendado**	
Referência	**Mecânica**	$[A^2s]$	**Tamanho**	$I_n\,[A]$
CFW110007B2	A	420	00	20

5.10 Considerações Finais

O presente Capítulo apresentou a metodologia utilizada na especificação dos elementos de potência dos manipuladores robóticos. Durante o processo de especificação, foram determinadas as razões de transmissão a serem utilizadas, foi realizada a estimação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente das máquinas propostas, avaliação dos conjugados máximos disponibilizados e máximos conjugados demandados pela aplicação e avalição da região de linearidade entre corrente de estator e conjugado para cada uma das máquinas elegíveis. Além disso, foram analisadas as temperaturas alcançadas e apreciada a energia consumida em uma repetição das trajetórias utilizadas para todas as máquinas propostas. Por fim, de posse da especificação das máquinas a serem utilizadas foram especificados os conversores de frequência mais adequados à aplicação.

A dinâmica lenta dos braços humanos tornou o processo de determinação das razões de transmissão do acionamento um processo bem complicado; pois, este fato tornou impraticável a especificação de relações de transmissão que fizessem com que as máquinas candidatas operassem em sua região de máxima eficiência, pois, para que isto fosse possível, seria necessária a utilização de relações de transmissão de valores muito elevados, o que implicaria em custos elevados e um enorme espaço para as mesmas.

Além da questão da eficiência, tal especificação levou as máquinas candidatas a operarem com velocidades muito reduzidas, o que, para máquinas autoventiladas é um problema, visto que o resfriamento das mesmas é diretamente dependente de sua velocidade de operação.

Por fim, apesar de todos os problemas enfrentados durante a especificação das máquinas a serem utilizadas pelos manipuladores robóticos devido à questão da dinâmica lenta dos braços humanos, a metodologia proposta tornou possível a sua especificação sem riscos de queima, desde que o tempo máximo de utilização contínua seja respeitado.

Capítulo 6

Construção dos manipuladores

"Nothing in life is to be feared, it is only to be understood. Now is the time to understand more, so that we may fear less."

Marie Curie

---

[a]Nada na vida deve ser temido, somente compreendido. Agora é hora de compreender mais para temer menos.

Tendo sido especificados as máquinas, os inversores, as relações de transmissão e a forma de transmissão de potência mecânica às juntas dos manipuladores, procede-se então para a etapa de construção. Nesta, o objetivo foi construir a estrutura mecânica de um manipulador de forma que esta fosse primeiramente segura; depois que apresentasse baixo custo, que tivesse a menor massa possível e que sua construção demandasse o menor trabalho possível, para reduzir os custos da mesma.

Tal estrutura trata-se de um protótipo e foi desenvolvida juntamente com um outro mestrando, no Laboratório de Máquinas e Transformadores (LaMeT), do Departamento de Engenharia Elétrica – DEPEL, UFSJ. O manipulador é fixado a uma estrutura feita em metalon, e com prateleiras em madeira, como apresentado na Figura 6.1.

Um fator muito importante e que foi tratado com muita seriedade é a segurança do operador dos manipuladores robóticos. Em estruturas meca-

Figura 6.1: Estrutura para fixação do manipulador e o manipulador desenvolvido.

trônicas como esta, as estratégias de segurança normalmente são implementadas em três níveis: eletrônico ou de *software*, mecânico e elétrico. Como a parte de controle desta estrutura mecatrônica foge do escopo deste trabalho, estratégias de segurança a nível eletrônico ou de *software* não foram implementadas.

No que diz respeito à segurança mecânica, o manipulador é dotado de travas mecânicas posicionadas para que não seja possível impor qualquer configuração que venha colocar em risco a integridade física do operador. Partindo então para a estratégia de natureza elétrica, caso alguma trava mecânica instalada venha a se quebrar, foram instaladas chaves fim de

curso no manipulador, posicionadas com o objetivo de desligar os motores nesta situação, de forma que novamente não se coloque em risco a integridade física do operador durante a operação dos manipuladores. Na Figura 6.2 é apresentada uma das chave fim de curso instaladas no manipulador robótico, na junta 2.

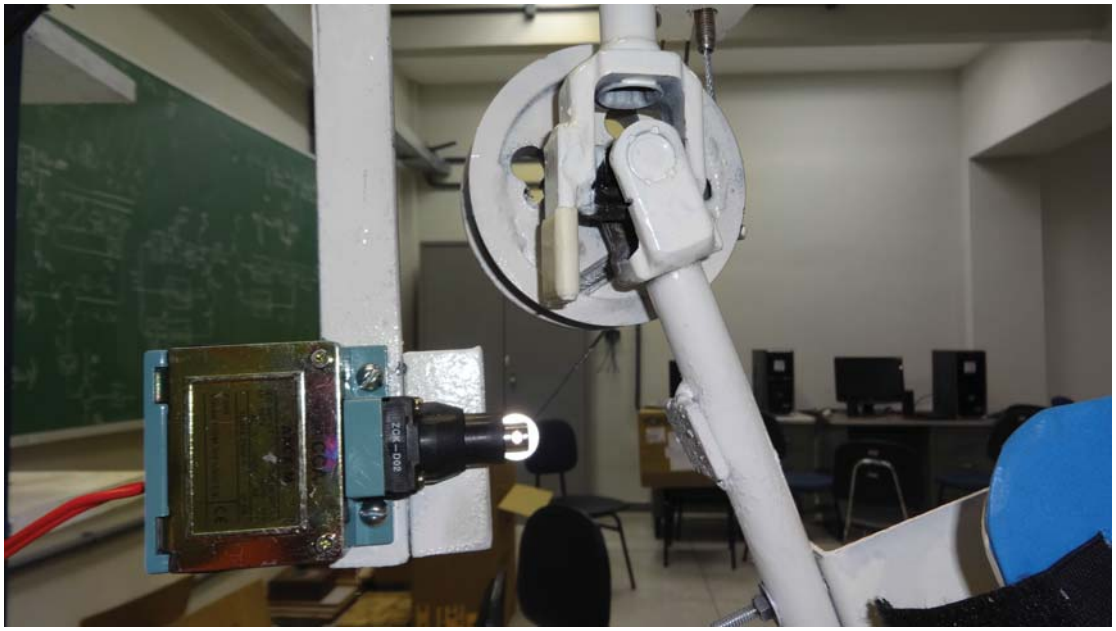
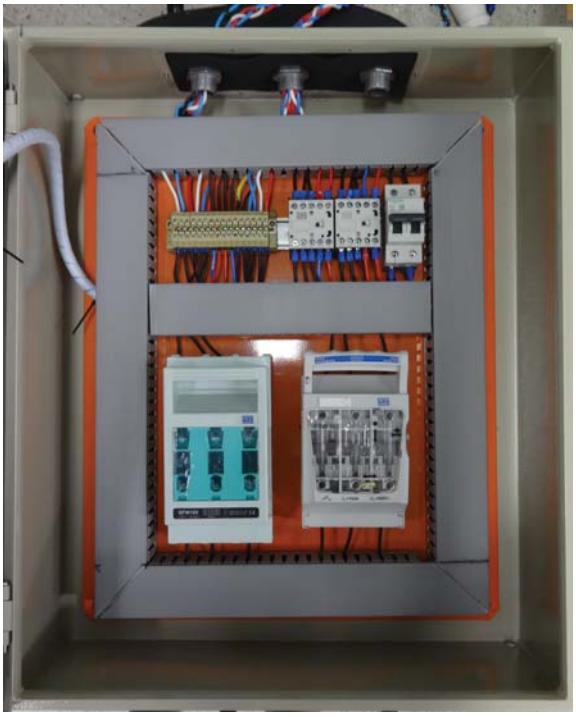


Figura 6.2: Chave de fim de curso instalada na junta 2 do manipulador robótico.

Ainda na estratégia de segurança de nível elétrico, o manipulador possui um botão cogumelo (tipo soco) à impulsão que fica instalado na tampa de um painel, e, caso seja acionado, imediatamente interrompe o suprimento de todos os motores do manipulador robótico desenvolvido. Nas Figuras 6.3a e 6.3b são apresentados o exterior e o interior do painel de comando construído, o qual conta com a botoeira de emergência já citada, um botão para energizar os conjuntos inversores/motores, um botão para desenergizar os conjuntos inversores/motores e sinaleiros para indicar que o painel está energizado e que os motores estão em funcionamento.

Como apresentado na Seção 5.1, as transmissões utilizadas nesta estrutura são uma combinação entre polias e correias em "V" (1° estágio) e polias e cabos de aço (2° estágio). A seguir são apresentados detalhes construtivos das transmissões construídas e as soluções implementadas.

(a) Exterior do painel construído.



(b) Interior do painel construído.

Figura 6.3: Exterior e interior do painel construído.

No primeiro estágio de transmissão foram utilizadas duas polias: uma menor, acoplada ao eixo do motor, e uma maior, acoplada a um eixo que é saída do primeiro estágio de transmissão e entrada do segundo, sendo ambas polias com perfil em "V", do tipo A e de um único canal, como pode ser observado nas Figuras 6.4a e 6.4b.

(a) Polia pequena do primeiro estágio de transmissão mecânica.

(b) Polia grande do primeiro estágio de transmissão mecânica.

Figura 6.4: Polias do primeiro estágio de transmissão mecânica.

Para o segundo estágio de transmissão, também foram utilizadas duas polias; embora com características um pouco diferentes das anteriores. Uma polia menor acoplada a um eixo que é saída do primeiro estágio de transmissão e entrada do segundo, como descrito anteriormente, com perfil em "V", do tipo B e de dois canais. Para atender a solução projetada, esta polia, que possuía perfil em "V", teve sua angulação modificada em tornearia, levando a mesma a um perfil de ângulo reto. Em cada um dos canais foram enrolados cabos de aço, cada um em um sentido, com o objetivo de obter torque nos manipuladores em dois sentidos. Desta forma, quando se quer torque num determinado sentido, um canal "libera" a medida necessária de cabo de aço, enquanto o outro canal "recolhe" este cabo, mantendo o mesmo sempre bem tensionado. Isto é fundamental para que se tenha um bom funcionamento do sistema de controle, implementado no trabalho do mestrando Francisco de Assis Dias. Os detalhes construtivos desta polia são apresentados na Figura 6.5.

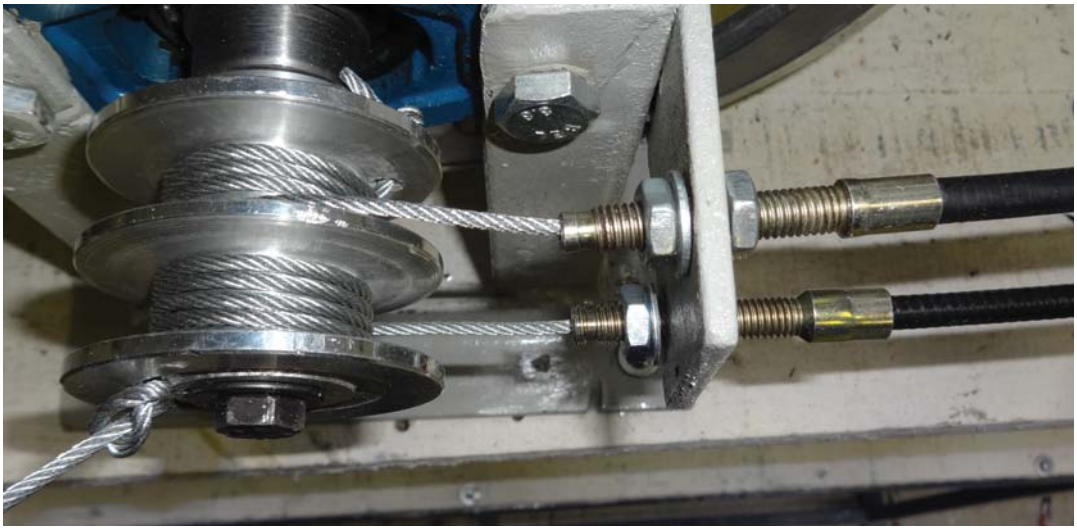
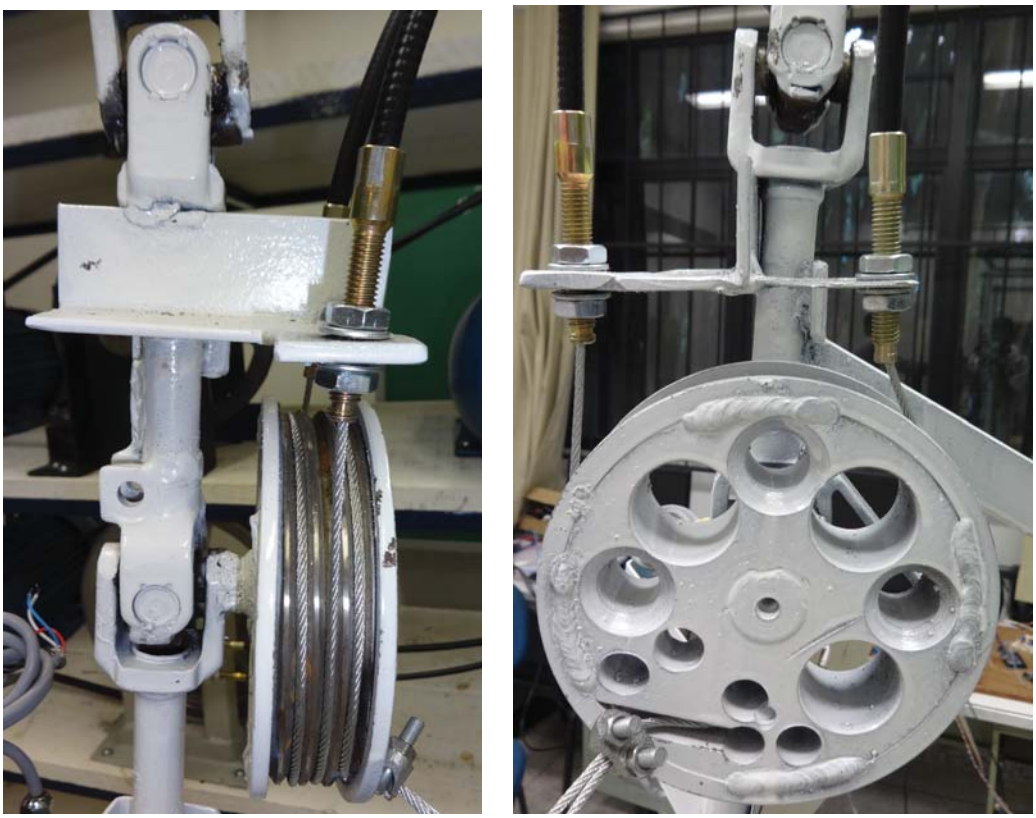


Figura 6.5: Polia do segundo estágio de transmissão mecânica e acoplada ao eixo de saída do primeiro estágio de transmissão mecânica.

A segunda polia deste estágio de transmissão fica acoplada ao eixo da junta do manipulador que se quer movimentar. Tal polia foi totalmente construída em tornearia e possui um único canal, sendo este helicoidal. Os cabos de aço que partem da polia anterior são conduzidos por meio de

conduítes de acelerador de trator, chegam ao centro deste canal helicoidal e são enrolados cada um para um lado da mesma, ainda com o objetivo de se obter torque nos dois sentidos. Há ainda um furo de cada lado destas polias, por onde os cabos de aço saem e são presos, de forma a ficarem bem tensionados, pelos motivos já expostos. A polia descrita é apresentada na Figura 6.6.



(a) Vista frontal da polia. (b) Vista lateral da polia.

Figura 6.6: Vistas frontal e lateral da polia do segundo estágio de transmissão mecânica e acoplada ao manipulador.

Foi citado anteriormente o uso de conduítes de acelerador de trator na condução dos cabos de aço do segundo estágio de transmissão mecânica; o uso destes conduítes, que podem ser observados nas Figuras 6.5 e 6.6, fez-se necessário por motivos diversos. Estes conduítes permitem que os cabos fiquem menos expostos, o que trouxe mais segurança, e possibilitam que os cabos de aço não se soltem das polias quando os manipuladores se movimentem, ajudando então no tensionamento dos cabos. Mas uma razão ainda mais importante para o uso dos conduítes foi a necessidade

de ancorar o cabo de aço logo na saída da polia de entrada do segundo estágio da transmissão mecânica e posteriormente próximo à polia de cada uma das juntas dos manipuladores. Caso fosse feito isso sem o uso de conduítes, para a junta 3, por exemplo, seria preciso ancorar os cabos de aço nos elos anteriores do braço robótico, e, durante o funcionamento dos manipuladores, o acionamento de uma junta, por causa da ancoragem dos referidos cabos, poderia resultar em forças não desejadas nos outros elos dos manipuladores, o que muito dificultaria o controle dos mesmos. Já com a utilização dos conduítes, a ancoragem foi feita da mesma forma, mas, como os cabos de aço passam internamente aos conduítes, não interferem no acionamento das demais juntas.

A estrutura apresentada ainda é um protótipo, sendo necessárias melhorias na mesma, como, por exemplo, uma forma mais ergonômica para que os usuários possam "vestir" o manipulador e que esta seja ajustável às diversas dimensões dos braços de diferentes usuários. Na Figura 6.7 é apresentada a interface construída para o manipulador desenvolvido.

Figura 6.7: Interface Homem Máquina para o manipulador desenvolvido.

Por fim, nas Figuras 6.8a e 6.8b são apresentadas fotos das vistas frontal e lateral de um usuário "vestindo" o manipulador desenvolvido.

Infelizmente, por questões financeiras, só foi possível construir um ma-

(a) Vista frontal do usuário e manipulador. (b) Vista lateral do usuário e manipulador.

Figura 6.8: Vistas frontal e lateral do usuário "vestindo" o manipulador desenvolvido.

nipulador, com apenas duas juntas. Entretanto, todas as soluções encontradas para a construção destas duas seriam as mesmas a serem utilizadas nas demais.

6.1 Soluções para a atenuação de ruídos nos manipuladores robóticos

Conversores de frequência com tensão imposta e modulação PWM são utilizados na maioria dos acionamentos de máquinas de indução, como apresentado por De Paula *et al.* (2008). Além disso, segundo o autor, dois problemas principais acontecem com tais sistemas: 1)Sobretensões transitórias nos terminais dos motores e 2)Correntes de modo comum de alta frequência. Estas correntes em alta frequência surgem devido ao cha-

veamento dos IGBT's dos conversores de frequência, os quais produzem tensões com taxa de variação da tensão no tempo, dV/dt, superiores a 3000V/μs, como já apresentado por WEG (2010). Tais pulsos compõem a tensão PWM e são aplicados aos condutores das máquinas. Tais condutores são feitos em cobre e possuem uma camada isolante em sua superfície, constituindo então um capacitor entre tais condutores e a carcaça da máquina, e assim, há circulação de corrente capacitiva entre os mesmos.

Diferentemente do que acontece no Veccar de Silva (2014), a carcaça destas máquinas são apoiadas em prateleiras de madeira; desta forma, há isolamento elétrico entre a carcaça das máquinas e a estrutura dos manipuladores. Assim, há apenas um caminho para acoplamento a partir da carcaça das máquinas, que é pelo cabo do encoder. Partindo do cabo do encoder, o ruído de modo comum retorna então ao inversor, quando é conectado ao módulo para encoder. Neste ponto existe, então, um caminho para que o ruído passe pelo sistema eletrônico, visto que há uma derivação dos sinais do encoder para as placas de condicionamento de sinal e de processamento, sendo que neste ponto parte do ruído de modo comum já retorna à fonte que o produziu. O ruído de modo comum que chega ao sistema de condicionamento de sinal e processamento pode seguir então para a entrada analógica, onde é conectado o sinal de referência de conjugado, o que prejudicaria o funcionamento do sistema. Pode ainda retornar à rede da concessionária e, posteriormente ao inversor por meio do circuito de alimentação do mesmo, o que também seria muito prejudicial ao funcionamento do sistema. Na Figura 6.9 são apresentados alguns caminhos para o ruído de modo comum produzido pelo chaveamento dos IGBT's.

Inibir a produção destes sinais com alto dV/dt não é uma possibilidade, visto que, como já foi explicado anteriormente, estes são produzidos para sintetizar os sinais PWM. Desta forma, a solução adotada foi a de criar um caminho alternativo de baixa impedância para o ruído de modo comum, de forma que este retorne à fonte que o produziu antes que seja acoplado ao sistema de condicionamento de sinais. Como explanado por

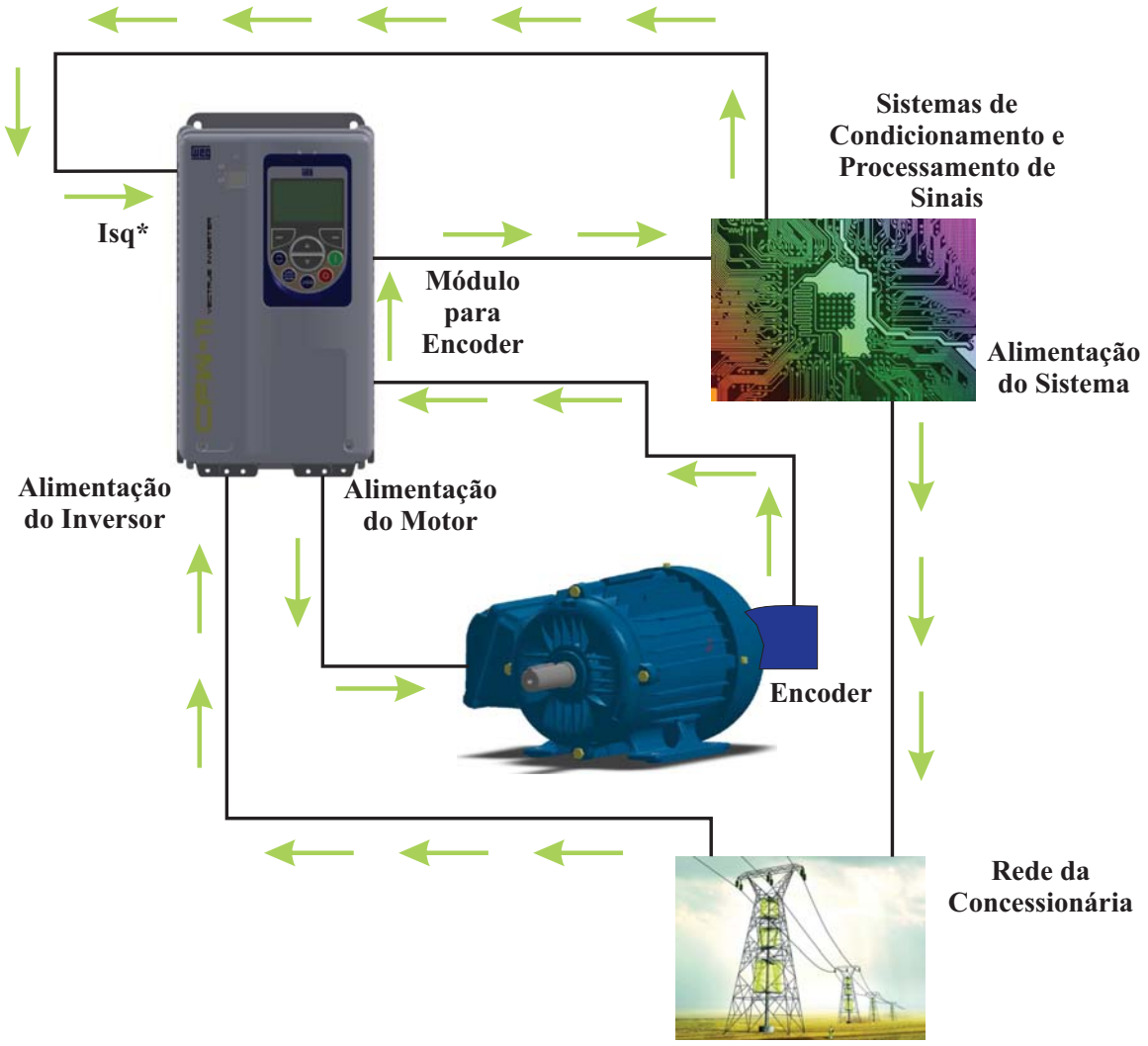


Figura 6.9: Caminhos para o ruído conduzido de modo comum.

Silva (2014) este caminho não pode ter contato elétrico com os cabos de conexão conversor-motor e, desta forma, o acoplamento deste aos cabos de potência será capacitivo. Para que se crie um capacitor é necessário que se tenha dois elementos condutores isolados por um dielétrico, e como a capacitância deste aumenta com a área dos condutores, foi aplicado um invólucro de papel alumínio em torno dos cabos de alimentação entre conversor e motor.

A solução realizada aplicando um invólucro de papel alumínio em torno dos cabos trançados de estator foi feita para que o ruído de modo comum tenha no papel alumínio um caminho de mais baixa impedância para re-

torno aos IGBT's, que são sua fonte, do que aquele que passa pelo sistema eletrônico. Na extremidade dos cabos do lado do conversor todas as blindagens do cabo do encoder são conectadas conforme indicado pelo fabricante, para que os ruídos retornem ao dissipador. Também como apresentado em Silva (2014), 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 IGBT's, dado que esses elementos são isolados somente por uma camada de baixa espessura de pasta térmica. Tal solução é apresentada na Figura 6.10.

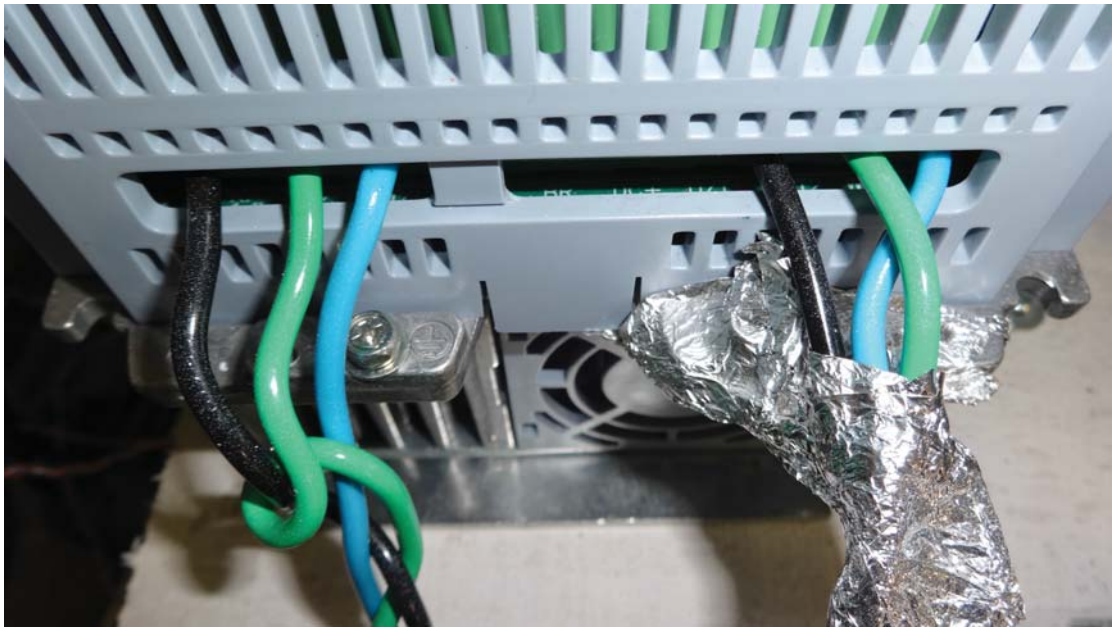


Figura 6.10: Aterramento do invólucro de papel alumínio dos cabos de alimentação ao dissipador do inversor.

Uma outra fonte de sinais com alta taxa de variação da tensão no tempo é o encoder. Entretanto, para o cabo deste sensor foi utilizado um cabo de instrumentação apropriado, com blindagem individual e coletiva (BIC). Neste cabo, cada par ou terna de cabos possui uma blindagem feita por uma fita de poliéster aluminizada e posteriormente todos os pares ou ternas com suas blindagens individuais são agrupados e uma outra fita de poliéster aluminizada recobre todos os pares e/ou ternas; fazendo então a blindagem coletiva. Todas estas blindagens então são conectadas de forma apropriada ao terminal de aterramento do módulo para encoder.

Para solucionar problemas de ruídos acoplados alguns cabos do sistemas foram trançados, como segue:

- Os três cabos de alimentação entre conversor e motor;
- Os três cabos de alimentação (+12V, -12V e GND) da fonte regulada para as placas de condicionamento;
- Os dois cabos de conexão (${i_{sq}}^*$ e GND) do sistema de processamento (Arduino) ao inversor;
- Cabos de sinal e seu respectivo cabo de referência entre as placas de condicionamento e o sistema de processamento (Arduino).

Por meio das soluções apresentadas nesta seção, juntamente com as soluções implementadas em *software* pelo mestrando Francisco de Assis Dias tornou-se possível a operação dos manipuladores de forma satisfatória, de forma que os ruídos que não podiam ter sua produção inibida pudessem ter seus efeitos indesejados reduzidos.

6.2 Sistema de Controle e Instrumentação do Exoesqueleto Robótico

O projeto e implementação do sistema de controle e instrumentação do exoesqueleto robótico de membros superiores construído será desenvolvido pelo mestrando Francisco de Assis Dias. Em seu trabalho, o mesmo realizará testes utilizando um sistema chamado WDSS (*Wireless Dynamics Sensor System*) da empresa Vernier, o qual é dotado de acelerômetros triaxiais, para determinar a banda passante de velocidade nos braços humanos. A banda passante obtida será utilizada na sintonia das duas malhas presentes em seu sistema de controle, que o mesmo desenvolverá em plataforma Arduino; (a malha de "Regulação de Força Nula" e a "Regulação de Velocidade Nula"). A primeira tem como objetivo amplificar a força desenvolvida pelo usuário e é percebida por meio de células de carga instaladas no exoesqueleto. Já a segunda, quando não há intenção de movimento por parte

do usuário, ou seja, não há força aplicada à célula de carga, tem como objetivo travar o eixo do motor e deixar a carga paralisada onde o usuário desejar. O mesmo realizará ainda o condicionamento dos sinais de força, obtidos por meio das células de carga, e dos sinais de velocidade dos motores, obtidos por meio de encoder's. Por fim, o mesmo realizará avaliações de desempenho e estabilidade do exoesqueleto desenvolvido para diversas características de trajetória e carga.

6.3 Considerações Finais

O presente Capítulo mostrou como se deu o processo de construção da estrutura e dos manipuladores robóticos desenvolvidos; as estratégias de segurança e soluções para atenuação de ruídos implementadas. Além disso, é apresentado de forma sucinta o trabalho que está sendo desenvolvido pelo mestrando Francisco de Assis Dias, o qual em seu trabalho desenvolve o sistema de controle e instrumentação dos exoesqueleto robótico.

A estrutura trata-se de um protótipo, foi desenvolvida no Laboratório de Máquinas e Transformadores (LaMeT), do Departamento de Engenharia Elétrica – DEPEL, UFSJ e, um quesito muito importante e que foi tratado com muita seriedade foi a segurança do operador dos manipuladores robóticos, onde estratégias de segurança de nível elétrico e mecânico foram implementadas. Apresenta-se ainda como foi realizada a construção/montagem das polias de cada um dos estágios da transmissão mecânica e a interface homem máquina elaborada.

Por fim, são expostas as medidas que foram tomadas para atenuação de ruídos nos manipuladores robóticos, de forma a tornar a operação dos mesmos viável. Estas medidas foram necessárias devido principalmente aos ruídos de modo comum produzidos pelo chaveamento dos IGBT's dos conversores de frequência, e, com soluções simples resultados satisfatórios foram obtidos.

Capítulo 7

Conclusões

"Le savant n'étudie pas la nature parce que cela est utile; il l'étudie parce qu'il y prend plaisir et il y prend plaisir parce qu'elle est belle. Si la nature n'était pas belle, elle ne vaudrait pas la peine d'être connue, la vie ne vaudrait pas la peine d'être vécue. Je ne parle pas ici, bien entendu, de cette beauté qui frappe les sens, de la beauté des qualités et des apparences ; non que j'en fasse fi, loin de là, mais elle n'a rien à faire avec la science ; je veux parler de cette beauté plus intime qui vient de l'ordre harmonieux des parties, et qu'une intelligence pure peut saisir."

Henri Poincaré

---

[a]O cientista não estuda a natureza porque ela é útil; ele a estuda porque se deleita nela, e se deleita nela porque ela é bela. Se a natureza não fosse bela, não valeria a pena ser conhecida, e se não valesse a pena ser conhecida, a vida não valeria a pena ser vivida.

7.1 Discussões Finais

O presente estudo apresentou uma metodologia para a especificação dos elementos de potência de uma estrutura mecatrônica, onde foi possível, a partir de dados de possíveis trajetórias para os manipuladores, desenvolver modelos dinâmicos dos manipuladores e modelos dinâmico e térmico das

máquinas de indução, especificar os motores de indução trifásicos, as relações de transmissão e os conversores de frequência mais adequados para a aplicação.

O trabalho foi iniciado realizando uma revisão bibliográfica em manipuladores robóticos e exoesqueletos apresentados na literatura e suas formas de acionamento. Pôde-se concluir que a maioria dos trabalhos desenvolvidos utilizam, no acionamento das juntas destes manipuladores, servoacionamentos e motores de corrente contínua. Incentivados por um trabalho correlato, que utiliza máquinas de indução trifásicas em seu acionamento, além dos possíveis benefícios da utilização destas, partiu-se para a especificação e implementação de uma estrutura mecatrônica de potência para um exoesqueleto robótico de membros superiores que tivessem máquinas de indução trifásicas como força motriz.

Ao iniciar o trabalho já era sabido que os braços humanos não têm uma dinâmica muito rápida; entretanto, somente após o sensoriamento de algumas trajetórias, foi possível perceber como a dinâmica dos braços humanos é lenta, principalmente para o tipo de atividade esperada para manipuladores robóticos propostos. Este fato foi um grande complicador para o desenvolvimento do trabalho, pois a baixa dinâmica dos braços humanos tornou impraticável a especificação de relações de transmissão que fizessem com que as máquinas candidatas operassem em sua região de máxima eficiência, pois, para que isto fosse possível, seria necessária a utilização de relações de transmissão de valores muito elevados, o que implicaria em custos elevados e um enorme espaço para as mesmas.

Além da questão da eficiência, tal especificação levou as máquinas candidatas a operarem com velocidades muito reduzidas, o que, para máquinas autoventiladas é um problema, visto que o resfriamento das mesmas é diretamente dependente de sua velocidade de operação.

Por fim, apesar de todos os problemas enfrentados durante a especificação das máquinas a serem utilizadas pelos manipuladores robóticos devido à questão da dinâmica lenta dos braços humanos, a metodologia

proposta tornou possível a sua especificação sem riscos de queima, desde que o tempo máximo de utilização contínua seja respeitado. Máquinas de potência inferior ou máquinas de mesma potência das especificadas poderiam ser utilizadas para acionar a mesma carga utilizada neste trabalho, caso o braço robótico desenvolvido tivesse uma massa inferior. Isto seria possível utilizando ligas de alumínio, as quais têm um terço da densidade do aço e possuem boa resistência mecânica, ou até mesmo materiais compósitos e/ou poliméricos. Entretanto, por limitações financeiras, e também de tempo isto não foi realizado neste trabalho.

7.2 Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se:

- Utilização de outros tipos de motores para o acionamento dos manipuladores, como servoacionamentos, os quais são mais comumente utilizados para este tipo de aplicação, apesar do custo mais elevado;
- Desenvolvimento de manipuladores robóticos com um maior número de graus de liberdade, tornando os movimentos realizados com o mesmo cada vez mais naturais e agradáveis aos usuários;
- Desenvolvimento de manipuladores robóticos que considerem, na sua fase de concepção, fatores antropométricos de seres humanos e que possam ser ajustáveis, de forma a permitir sua utilização por um maior número de pessoas;
- Desenvolvimento de uma interface ergonômica entre os usuários e os manipuladores;
- Desenvolvimento de um exoesqueleto que possua também membros inferiores, visando uma estrutura que possa ser "carregada"pelo usuário;
- Utilização de um banco de baterias para a alimentação do link CC dos inversores, para que os manipuladores ganhem uma maior liberdade;

- Desenvolvimento de braços robóticos mais leves utilizando alumínio, materiais compósitos e/ou poliméricos.

Referências Bibliográficas

ABNT (Rio de Janeiro, 2002). ABNT NBR 5383-1. Máquinas elétricas girantes — Parte 1: Motores de indução trifásicos — Ensaios.

ABNT (Rio de Janeiro, 2003). ABNT NBR 7094. Máquinas elétricas girantes — Motores de indução — Especificação.

Andrade, A. S. (2014). Elementos orgânicos de máquinas II AT-102 - UFPR - Aula 01. Disponível em: http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasalan/AT102-Aula01.pdf. Acesso em: 02/10/2014.

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.*

Bergamasco, M., Allotta, B., Bosio, L., Ferretti, L., Parrini, G., Prisco, G., Salsedo, F., e Sartini, G. (1994). An arm exoskeleton system for teleoperation and virtual environments applications. In *Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on*, pp. 1449–1454 vol.2.

Buckle, P. W. e Jason Devereux, J. (2002). The nature of work-related neck and upper limb musculoskeletal disorders. *Applied ergonomics*, 33(3):207–217.

Caldwell, D., Kocak, O., e Andersen, U. (1995). Multi-armed dexterous manipulator operation using glove/exoskeleton control and sensory feedback. In *Intelligent Robots and Systems 95. Human Robot Interaction and*

Cooperative Robots, Proceedings. 1995 IEEE/RSJ International Conference on, volume 2, pp. 567–572.

Carneiro, S. R. M. (1997). O custo das LER. *Revista Proteção*, pp. 74–77.

Chaffin, D. B., Andersson, G. B. J., e Martin, B. J. (2001). *Biomecânica Ocupacional.* 1 ed., Belo Horizonte - MG: Ergo. Biomecânica Ocupacional como especialidade.

Choset, H., Lynch, K., Hutchinson, S., Kantor, G., Burgard, W., Kavraki, L., e Thrun, S. (2005). *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations.* The MIT Press.

De Paula, H., de Andrade, D., Chaves, M., Domingos, J., e de Freitas, M. (2008). Methodology for cable modeling and simulation for high-frequency phenomena studies in PWM motor drives. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 23(2):744–752.

de Sá, J. S. (1989). *Contribuição à análise do comportamento térmico de motores de indução trifásicos com rotor do tipo gaiola.* Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP.

Fasoli, S. E., Krebs, H. I., Stein, J., Frontera, W. R., e Hogan, N. (2003). Effects of robotic therapy on motor impairment and recovery in chronic stroke. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 84(4):477–482.

Fisher, C. J. (2010). Using an accelerometer for inclination sensing. *AN-1057, Application Note, Analog Devices.*

Forner-Cordero, A., Pons, J., Wisse, M., Ceres, R., e Calderón, L. (2008). *Basis for bioinspiration and biomimetism in wearable robots.* John Wiley & Sons, Ltd.

Frisoli, A., Borelli, L., Montagner, A., Marcheschi, S., Procopio, C., Salsedo, F., Bergamasco, M., Carboncini, M., Tolaini, M., e Rossi, B. (2007). Arm rehabilitation with a robotic exoskeleleton in virtual reality. In

Rehabilitation Robotics, 2007. ICORR 2007. IEEE 10th International Conference on, pp. 631–642.

Frisoli, A., Rocchi, F., Marcheschi, S., Dettori, A., Salsedo, F., e Bergamasco, M. (2005). A new force-feedback arm exoskeleton for haptic interaction in virtual environments. In *Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint*, pp. 195–201.

Furtado, E. M. (2007). *Formação do indivíduo, transformação da sociedade - Ensino Médio - 2ª Série*, volume 4. Editora Positivo.

Gopura, R. A. R. C. e Kiguchi, K. (2009). Mechanical designs of active upper-limb exoskeleton robots: State-of-the-art and design difficulties. In *Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference on*, pp. 178–187.

Gopura, R. A. R. C., Kiguchi, K., e Bandara, D. S. V. (2011). A brief review on upper extremity robotic exoskeleton systems. In *Industrial and Information Systems (ICIIS), 2011 6th IEEE International Conference on*, pp. 346–351.

Hogan, N., Krebs, H. I., Charnnarong, J., Srikrishna, P., e Sharon, A. (1992). Mit-manus: a workstation for manual therapy and training. i. In *Robot and Human Communication, 1992. Proceedings., IEEE International Workshop on*, pp. 161–165. IEEE.

IEC (2006). IEC 60034-17: Rotating Electrical Machines - part 17: Cage Induction Motors when Fed from Converters - Application Guide.

Kawamoto, H., Lee, S., Kanbe, S., e Sankai, Y. (2003). Power assist method for hal-3 using emg-based feedback controller. In *Systems, Man and Cybernetics, 2003. IEEE International Conference on*, volume 2, pp. 1648–1653 vol.2.

Kazerooni, H. (1996). The human power amplifier technology at the university of california, berkeley. *Robotics and autonomous systems*, 19(2):179–187.

Kazerooni, H. (1998). Human power extender: an example of human-machine interaction via the transfer of power and information signals. In *Advanced Motion Control, 1998. AMC '98-Coimbra., 1998 5th International Workshop on*, pp. 565–572.

Kazerooni, H. (2005). Exoskeletons for human power augmentation. In *Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 3459–3464.

Kostenko, M. P. e Piotrovskij, L. M. (1969). *Electrical machines: in two volumes. Alternating current machines.* Mir.

Krebs, H., Volpe, B., Ferraro, M., Fasoli, S., Palazzolo, J., Rohrer, B., Edelstein, L., e Hogan, N. (2002). Robot-aided neurorehabilitation: from evidence-based to science-based rehabilitation. *Topics in stroke rehabilitation*, 8(4):54–70.

Kroemer, K. H. e Grandjean, E. (1998). *Manual de ergonomia: adaptando o trabalho ao homem.* Bookman, 5ª edi.

Lipo, T. A. e Novotny, D. W. (1998). *Vector Control and Dynamics of AC Drives.* Clarendon Press, Oxford.

Marcheschi, S., Salsedo, F., Fontana, M., e Bergamasco, M. (2011). Body extender: Whole body exoskeleton for human power augmentation. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 611–616.

Martinez, F., Retolaza, I., Pujana-Arrese, A., Cenitagoya, A., Basurko, J., e Landaluze, J. (2008). Design of a five actuated DoF upper limb exoskeleton oriented to workplace help. In *Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2008. BioRob 2008. 2nd IEEE RAS EMBS International Conference on*, pp. 169–174.

McDaid, A., Kora, K., Xie, S., Lutz, J., e Battley, M. (2013). Human-inspired robotic exoskeleton (hurex) for lower limb rehabilitation. In *Mechatronics and Automation (ICMA), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 19–24.

Melhorn, J. M. (1998). Cumulative trauma disorders and repetitive strain injuries the future. *Clinical orthopaedics and related research*, 351:107–126.

Melhorn, J. M. e Gardner, P. (2004). How we prevent prevention of musculoskeletal disorders in the workplace. *Clinical orthopaedics and related research*, 419:285–296.

MNCMR (2008). Elementos para organização da coleta seletiva e projeto dos galpões de triagem. Disponível em: http://www.mncr.org.br/box_4/publicacoes-on-line/Manual Coleta Seletiva.pdf. Acesso em: 01/05/2013.

Mosher, R. S. (1967). *Handyman to Hardiman*. Society of Automotive Engineers.

Muggleton, J., Allen, R., e Chappell, P. (1999). Hand and arm injuries associated with repetitive manual work in industry: a review of disorders, risk factors and preventive measures. *Ergonomics*, 42(5):714–739.

Norton, R. L. (2011). *Kinematics and Dynamics of Machinery*. McGraw-Hill Higher Education.

NRC (2001). *Musculoskeletal disorders and the workplace: low back and upper extremities*. Natl Academy Pr.

Pereira, C. B. G. (2014). Sistemas mecânicos e eletromecânicos - Aula 6 - Polias e Correias. Disponível em: http://files.carlosbernardo.com/200001050-d0f3bd1ee7/Aula 06 - Polias e Correias.pdf. Acesso em: 02/10/2014.

Pereira, J. E., Pinto, M. C., e de Souza, R. A. (2007). Prevalência de lombalgias em transportadores de sacos de café. *Motriz. Revista de Educação Física. UNESP*, 12(3):229–238.

Perry, J., Rosen, J., e Burns, S. (2007). Upper-limb powered exoskeleton design. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 12(4):408–417.

Punnett, L., Prüss-Ütün, A., Nelson, D. I., Fingerhut, M. A., Leigh, J., Tak, S., e Phillips, S. (2005). Estimating the global burden of low back pain attributable to combined occupational exposures. *American journal of industrial medicine*, 48(6):459–469.

Reis, G. L. (2014). *Controle de um manipulador robótico utilizando sensores inerciais e eletromiografia.* Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Associação Ampla UFSJ/CEFET-MG.

Reis, R. J., Pinheiro, T. M., Navarro, A., e M, M. M. (2000). Perfil da demanda atendida em ambulatório de doenças profissionais e a presença de lesões por esforços repetitivos. *Revista de Saúde Pública*, 34(3):292–298.

Repperger, D., Hill, B. O., Hasser, C., Roark, M., e Phillips, C. (1996). Human tracking studies involving an actively powered, augmented exoskeleton. In *Biomedical Engineering Conference, 1996., Proceedings of the 1996 Fifteenth Southern*, pp. 28–31.

Rosen, J. e Perry, J. C. (2007). Upper limb powered exoskeleton. *International Journal of Humanoid Robotics*, 4(3):529–548.

Santana, V. S. e Oliveira, R. P. (2004). Saúde e trabalho na construção civil em uma área urbana do Brasil. *Cad. Saúde Pública*, 20(3):797–811.

Siliciano, B., Sciavicco, L., Villani, L., e Giuseppe, O. (2009). *Robotics: Modelling, Planning and Control.* Springer.

Silva, L. A. R. (2014). *Projeto e implementação de um acionamento elétrico embarcado para auxílio à tração humana em sistemas de transporte de carga.* Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Snyder, T. e Kazerooni, H. (1996). A novel material handling system. In *Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on*, volume 2, pp. 1147–1152 vol.2.

Spong, M. W. e Vidyasagar, M. (1989). *Robot Dynamics and Control.* John Wiley and Sons.

STMicroelectronics (2010). Tilt measurement using a low-g 3-axis accelerometer. *AN-3182, Application Note, STMicroelectronics.*

Vertechy, R., Frisoli, A., Dettori, A., Solazzi, M., e Bergamasco, M. (2009). Development of a new exoskeleton for upper limb rehabilitation. In *Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference on*, pp. 188–193.

Walsh, C., Pasch, K., e Herr, H. (2006). An autonomous, underactuated exoskeleton for load-carrying augmentation. In *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 1410–1415.

WEG (2001). CFW11 - Guia de fusíveis recomendados. Disponível em: http://www.weg.net/files/products/WEG-cfw-11-guia-de-fusiveis-recomendados-10001345585-guia-rapido-portugues-br.pdf. Acesso em: 01/02/2015.

WEG (2005). Guia de aplicação - Inversores de frequência. 3ª Edição. Disponível em: http://pt.scribd.com/doc/36891224/Guia-de-Aplicacao-de-Inversores-de-Frequencia-WEG-3 Acesso em: 01/09/2013.

WEG (2010). Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM. *Guia Técnico, Brasil.*

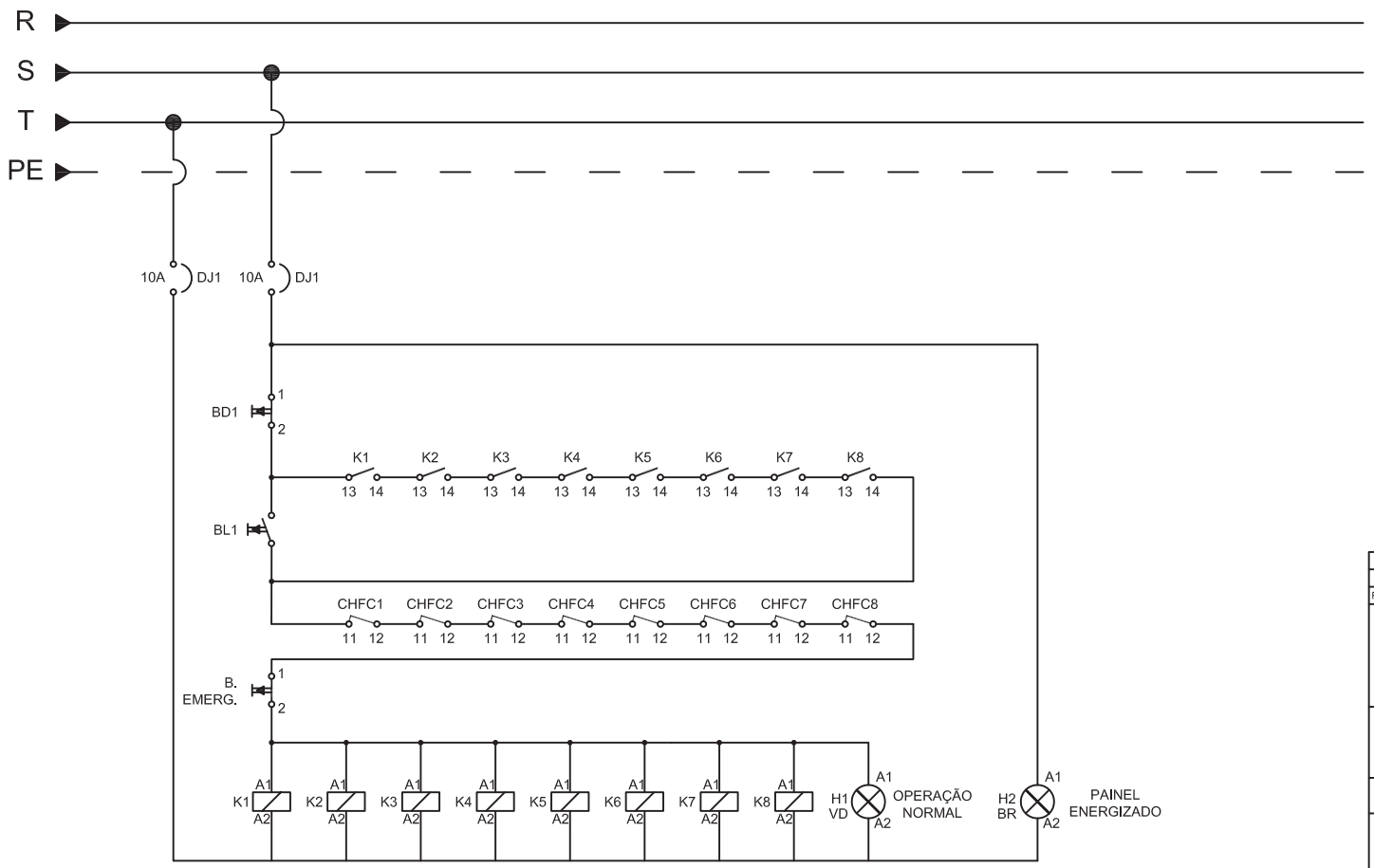
WEG (2013). CFW11 - Manual do usuário inversor de frequência. Disponível em: http://www.weg.net/files/products/WEG-cfw-11-manual-do-usuario-mec.-a-a-d-10000062964-manual-portugues-br.pdf. Acesso em: 01/09/2013.

Apêndice A

Diagramas de Comando e Força dos Manipuladores Robóticos

A.1 Diagrama de Comando dos Manipuladores Robóticos

DIAGRAMA MULTIFILAR - DIAGRAMA DE COMANDO DO MANIPULADOR ROBÓTICO



NOTAS

1. ESTE PROJETO FOI ELABORADO DE ACORDO COM AS NORMAS: NBR-5410/2004(2008) E NBR-13.570/1996.
2. OS CONDUTORES UTILIZADOS DEVERÃO SER DE COBRE, COM ISOLAMENTO EM PVC/70ºC, ANTICHAMA, TEMPERATURA DE REFERÊNCIA DO AMBIENTE 30ºC (AR) E 20ºC (SOLO); CONDUTORES NÃO ESPECIFICADOS #1,5mm² PARA ILUMINAÇÃO E 2,5mm² PARA FORÇA;
3. A SEÇÃO DOS CONDUTORES ESTÃO ESPECIFICADAS EM mm²;
4. IDENTIFICAÇÃO DOS CONDUTORES:
   - 4.1. FASE: PRETO
   - 4.2. NEUTRO: AZUL CLARO
   - 4.3. PROTEÇÃO: VERDE
   - 4.4. RETORNO: AMARELO, BRANCO, VERMELHO, CINZA, ETC;
5. FOI CONSIDERADO NO PROJETO DISJUNTORES TERMOMAGNÉTICOS DO TIPO DIN COM CURVA DE DISPARO TIPO C, COM DISPARO MAGNÉTICO ENTRE 5 E 10 x In;
6. ATERRAR AS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS, QUADROS, EQUIPAMENTOS, ETC, A PARTIR DAS CAIXAS DE EQUALIZAÇÃO PARA ATERRAMENTO;
7. INSTALAR TERMINAIS NAS EXTREMIDADES DOS CONDUTORES QUE ALIMENTAM TOMADAS E INTERRUPTORES, PARA EVITAR QUE O PARAFUSO DAS TOMADAS E INTERRUPTORES CORTEM OS CONDUTORES; ISTO TAMBÉM É VÁLIDO PARA CONEXÃO AOS TERMINAIS DOS DISJUNTORES;
8. EXECUTAR TODA A INSTALAÇÃO ELÉTRICA COM CONDUTOR DE PROTEÇÃO, CONFORME ESPECIFICADO NO PROJETO;
9. ESTE PROJETO ESTÁ SUJEITO A MODIFICAÇÕES DE ACORDO COM AS NECESSIDADES DEVENDO AS MESMAS SEREM AUTORIZADAS PELO RESPONSÁVEL TÉCNICO PELO PROJETO;

LEGENDA

	CONDUTORES FASE, NEUTRO, PROTEÇÃO E RETORNO, REPECTIVAMENTE. CONDUTORES NÃO COTADOS SERÃO DE #1,5mm² - NÃO ESPECIFICADOS SERÃO EM COBRE, TÊMPERA MOLE, COM ISOLAÇÃO EM PVC 750V - NBR NM 247-3.
	CONTATO ABERTO (NA).
	CONTATO FECHADO (NF).
	BOTÃO LIGA (BL).
	BOTÃO DESLIGA (BD).
	ELEMENTO DE COMANDO ELETROMAGNÉTICO - CONTATOR (K).
	RELÉ TÉRMICO (E).
	DISJUNTOR BIPOLAR (DJ).
	DISJUNTOR TRIPOLAR (DJ).
	SINALEIRO LED 220V (H). VM-VERMELHO, BR-BRANCO
	BORNE TERMINAL (X). X200 - RÉGUA DE BORNE - COMANDO LOCAL - 220Vac; XF - RÉGUA DE BORNE - FORÇA LOCAL - 220Vac
	FUSÍVEL (F).
	CHAVE SELETORA DE DOIS PÓLOS (SPDT).
CHFC	CHAVE FIM DE CURSO.

REV	DATA	DES	PROJ.	VERIF.	APROV.	FINALID.	DESCRIÇÃO
0	-	-	-	-	-	PR	EMISSÃO INICIAL

TABELA DE REVISÕES

CÓDIGO DA FINALIDADE:

PR - PRELIMINAR
PA - PARA APROVAÇÃO
PI - PARA INFORMAÇÃO
PC - PARA COTAÇÃO
CD - PARA COMENTÁRIOS
LE - LIBERADO PARA EXECUÇÃO
LD - LIBERADO PARA DETALHAMENTO
CC - CONFORME CONSTRUÍDO
SB - SUBSTITUÍDO
CA - CANCELADO

RESPONSÁVEL TÉCNICO DO PROJETO: CAIO EDUARDO SILVA — CREA: MG159699/D

RESPONSÁVEL TÉCNICO DO PROJETO: XXX — XXX

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

PROJETO

UFSJ UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI

CAMPUS: SÃO JOÃO DEL-REI

SETOR/DEPARTAMENTO: PPGEL/DEPEL

TÍTULO: DIAGRAMAS DE COMANDO E FORÇA DOS MANIPULADORES ROBÓTICOS

CONTEÚDO DA FOLHA: DIAGRAMAS DE COMANDO DOS MANIPULADORES ROBÓTICOS.

DATA: 01/04/2015

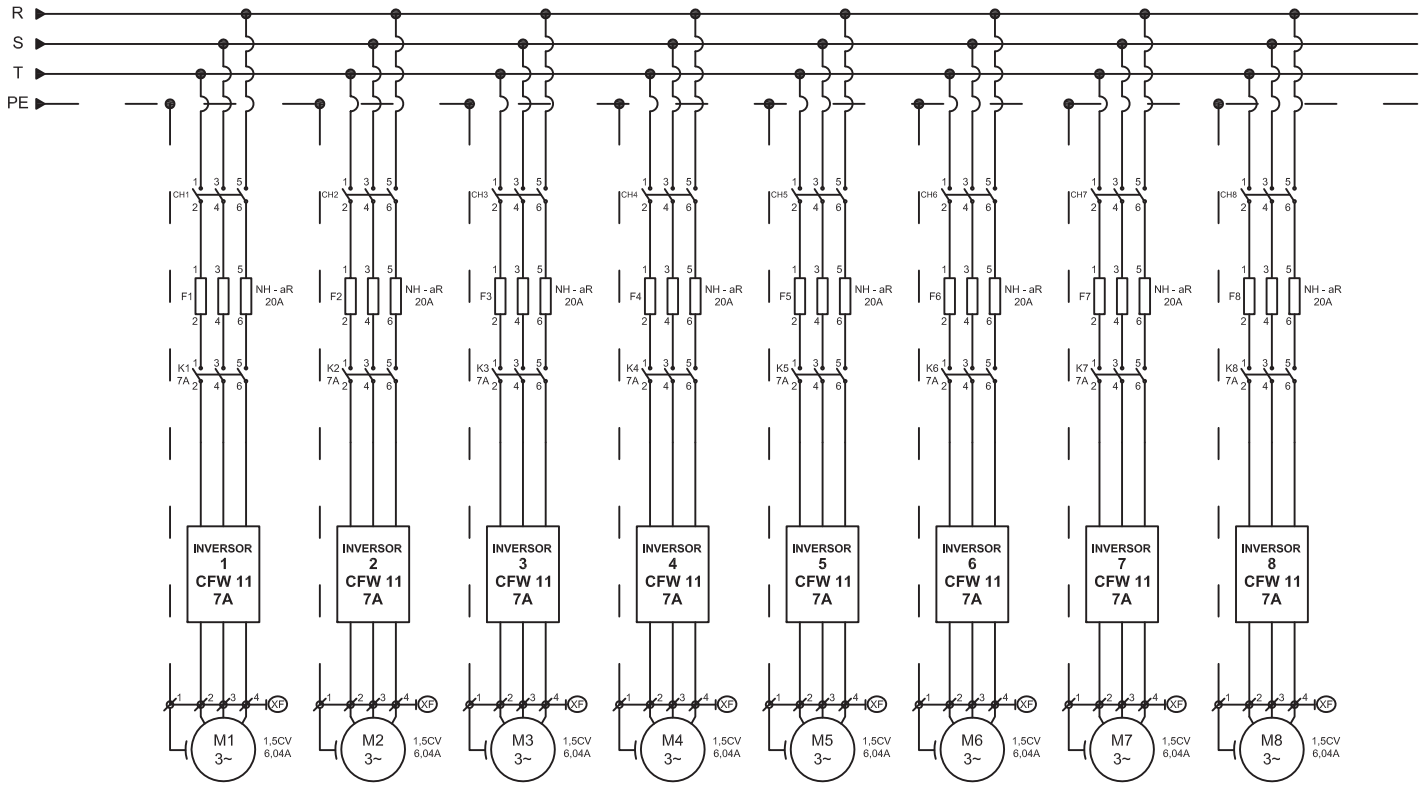
FORMATO: A4

FOLHA: 02/02

ESCALA: SEM ESCALA

A.2 Diagrama de Força dos Manipuladores Robóticos

DIAGRAMA MULTIFILAR - DIAGRAMA DE FORÇA DO MANIPULADOR ROBÓTICO



NOTAS

1. ESTE PROJETO FOI ELABORADO DE ACORDO COM AS NORMAS: NBR-5410/2004(2008) E NBR-13.570/1996.
2. OS CONDUTORES UTILIZADOS DEVERÃO SER DE COBRE, COM ISOLAMENTO EM PVC/70ºC, ANTICHAMA, TEMPERATURA DE REFERÊNCIA DO AMBIENTE 30ºC (AR) E 20ºC (SOLO); CONDUTORES NÃO ESPECIFICADOS #1,5mm² PARA ILUMINAÇÃO E 2,5mm² PARA FORÇA;
3. A SEÇÃO DOS CONDUTORES ESTÃO ESPECIFICADAS EM mm²;
4. IDENTIFICAÇÃO DOS CONDUTORES:
   - 4.1. FASE: PRETO
   - 4.2. NEUTRO: AZUL CLARO
   - 4.3. PROTEÇÃO: VERDE
   - 4.4. RETORNO: AMARELO, BRANCO, VERMELHO, CINZA, ETC;
5. FOI CONSIDERADO NO PROJETO DISJUNTORES TERMOMAGNÉTICOS DO TIPO DIN COM CURVA DE DISPARO TIPO C, COM DISPARO MAGNÉTICO ENTRE 5 E 10 x In;
6. ATERRAR AS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS, QUADROS, EQUIPAMENTOS, ETC, A PARTIR DAS CAIXAS DE EQUALIZAÇÃO PARA ATERRAMENTO;
7. INSTALAR TERMINAIS NAS EXTREMIDADES DOS CONDUTORES QUE ALIMENTAM TOMADAS E INTERRUPTORES, PARA EVITAR QUE O PARAFUSO DAS TOMADAS E INTERRUPTORES CORTEM OS CONDUTORES; ISTO TAMBÉM É VÁLIDO PARA CONEXÃO AOS TERMINAIS DOS DISJUNTORES;
8. EXECUTAR TODA A INSTALAÇÃO ELÉTRICA COM CONDUTOR DE PROTEÇÃO, CONFORME ESPECIFICADO NO PROJETO;
9. ESTE PROJETO ESTÁ SUJEITO A MODIFICAÇÕES DE ACORDO COM AS NECESSIDADES DEVENDO AS MESMAS SEREM AUTORIZADAS PELO RESPONSÁVEL TÉCNICO PELO PROJETO;

LEGENDA

	CONDUTORES FASE, NEUTRO, PROTEÇÃO E RETORNO, REPECTIVAMENTE. CONDUTORES NÃO COTADOS SERÃO DE #1,5mm² - NÃO ESPECIFICADOS SERÃO EM COBRE, TÊMPERA MOLE, COM ISOLAÇÃO EM PVC 750V - NBR NM 247-3.
	CONTATO ABERTO (NA).
	CONTATO FECHADO (NF).
	BOTÃO LIGA (BL).
	BOTÃO DESLIGA (BD).
	ELEMENTO DE COMANDO ELETROMAGNÉTICO - CONTATOR (K).
	RELÉ TÉRMICO (E).
	DISJUNTOR BIPOLAR (DJ).
	DISJUNTOR TRIPOLAR (DJ).
	SINALEIRO LED 220V (H). VM-VERMELHO, BR-BRANCO
	BORNE TERMINAL (X). X200 - RÉGUA DE BORNE - COMANDO LOCAL - 220Vac; XF - RÉGUA DE BORNE - FORÇA LOCAL - 220Vac
	FUSÍVEL (F).
	CHAVE SELETORA DE DOIS PÓLOS (SPDT).
CHFC	CHAVE FIM DE CURSO.

REV	DATA	DES	PROJ.	VERIF.	APROV.	FINALID.	DESCRIÇÃO
0	-	-	-	-	-	PR	EMISSÃO INICIAL

TABELA DE REVISÕES

CÓDIGO DA FINALIDADE:

- PR - PRELIMINAR
- PA - PARA APROVAÇÃO
- PI - PARA INFORMAÇÃO
- PC - PARA COTAÇÃO
- CD - PARA COMENTÁRIOS
- LE - LIBERADO PARA EXECUÇÃO
- LD - LIBERADO PARA DETALHAMENTO
- CC - CONFORME CONSTRUÍDO
- SB - SUBSTITUÍDO
- CA - CANCELADO

RESPONSÁVEL TÉCNICO DO PROJETO: CAIO EDUARDO SILVA

RESPONSÁVEL TÉCNICO DO PROJETO: XXX

CREA: MG159699/D

XXX

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

PROJETO

UFSJ UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI

CAMPUS: SÃO JOÃO DEL-REI

SETOR/DEPARTAMENTO: PPGEL/DEPEL

TÍTULO: DIAGRAMAS DE COMANDO E FORÇA DOS MANIPULADORES ROBÓTICOS

CONTEÚDO DA FOLHA: DIAGRAMAS DE FORÇA DOS MANIPULADORES ROBÓTICOS.

DATA: 01/04/2015

FORMATO: A4

FOLHA: 01/02

ESCALA: SEM ESCALA