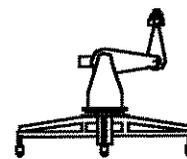




Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Sistemas e Controle de Energia
Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos



Seleção de Atuadores e Acionamento Integrada a Modelagem de Manipuladores Robóticos Industriais

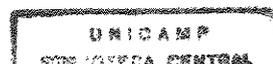
Autor: Nilton Cardoso da Silva

Orientador: João Maurício Rosário, UNICAMP / FEM

Co-orientador: Álvaro Geraldo Badan Palhares, UNICAMP / FEEC

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por Nilton Cardoso da Silva e aprovada pela Comissão Julgada em 26 / 03 / 1998.
João Maurício Rosário
Orientador

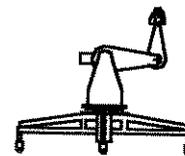
Campinas: 26 Março de 1998



98/4925



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Sistemas e Controle de Energia
Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos



Seleção de Atuadores e Acionamento Integrada a Modelagem de Manipuladores Robóticos Industriais

Tese submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, para preenchimento dos pré-requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Autor: Nilton Cardoso da Silva

Orientador: João Maurício Rosário, UNICAMP / FEM

Co-orientador: Álvaro Geraldo Badan Palhares, UNICAMP / FEEC

Campinas: 26 Março de 1998

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Si38s

Silva, Nilton Cardoso da

Seleção de atuadores e acionamento integrada a modelagem de manipuladores robóticos industriais / Nilton Cardoso da Silva.--Campinas, SP: [s.n.], 1998.

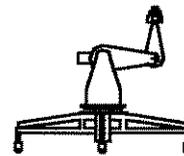
Orientadores: João Maurício Rosário, Álvaro Gerado Badan Palhares.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Simulação. 2. Robos industriais. 3. Robôs – Dinâmica – Modelos matemáticos. 4. Manipuladores (Mecanismo) 5. Motores elétricos de corrente contínua. .
I. Rosário, João Maurício. II. Palhares, Álvaro Geraldo Badan. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Sistemas e Controle de Energia
Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos



**Tese: - Seleção de Atuadores e Acionamento Integrada a
Modelagem de Manipuladores Robóticos
Industriais**

Autor: - Nilton Cardoso da Silva

Orientador: - João Maurício Rosário, UNICAMP / FEM

Co-orientador: - Álvaro Geraldo Badan Palhares, UNICAMP / FEEC

Tese examinada e aprovada em 26 de Março de 1998 pela seguinte Banca examinadora:

Prof. Dr. João Maurício Rosário, UNICAMP / FEM (Presidente)

Prof. Dr. Alberto Cliquet Junior, UNICAMP / FEEC

Prof. Dr. Marconi Kolm Madrid, UNICAMP / FEEC

Prof. Dr. Haroldo Rodrigues Azevedo, UFU / Uberlândia

Prof. Dr. José Manuel Baltazar, UNESP / Rio Claro

Dedicatória

Dedico a realização deste trabalho ao supremo Deus que criou tudo que existe, que deu a vida a tudo que vive, enfim, me criou, me deu vida e me mantém. Ao meu pai Divino Cardoso da Silva e minha mãe Cirlene Alvares da Silva pelo exemplo de dedicação, humildade, perseverança e pelo apoio moral. Aos meus irmãos Sandra e Edivane, meus cunhados Luis Carlos e Maria Inês e minha namorada Kelly Cristina, aqueles cuja companhia e existência me dão satisfação, e à nação e povo brasileiros para quem eu pesquiso e trabalho na esperança de ver cada dia mais livre.

Agradecimentos

Ao **Prof. João Maurício Rosário**, pela orientação e acompanhamento do trabalho, e também pela compreensão, tolerância, respeito e amizade durante todo o tempo que trabalhamos juntos.

Ao **Prof. Álvaro Geraldo B. Palhares**, pela orientação, pela idéia original e motivação de trabalhar com a seleção de atuadores, e fornecimento de uma vasta referência bibliográfica sobre o assunto, que foi um excelente ponto de partida para este estudo, e por permitir que parte deste trabalho fosse desenvolvido no Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos.

Ao **Prof. Marconi Madrid Kolm**, por todo apoio onde através do projeto do manipulador JECA II, nos permitiu ter uma visão prática de muitos problemas relacionados com este trabalho.

Ao **Eng. Valmir Tadeu Fernandes** por informações prestadas sobre os processo construtivo do JECA II e espírito de companheirismo demonstrado quando estivemos juntos.

À bibliotecária **Raquel Cocatto Ribeiro** cuja contribuição profissional nos auxiliou agilizando intensamente a fase de pesquisa bibliográfica.

Ao meu irmão **Edivane Cardoso da Silva**, pelo empréstimo de seu equipamento de informática, e instruções sobre uso de softwares do windows como o COREL DRAW, POWER POINT, WORD e outros que também contribuíram para a valorização da apresentação visual deste trabalho.

Ao técnico mecânico, **Eduardo Gavira Bonani**, pelas informações prestadas sobre o projeto mecânico do robô JECA II, boa vizinhança e amizade.

Aos colegas e amigos **Reinaldo Gonçalves Nogueira** e **Paulo Rogério Comin** pelas instruções sobre utilização de SUN-OS, LATEX, XFIG, Windows e SPARC station que valorizaram a redação deste trabalho.

A **Geraldo Perez Caixeta**, **Ely Carneiro de Paiva**, **Leonardo Neponuceno** e **Eduardo Cavalcante**, pelos anos de amizade, companheirismo, boa vizinhança e auxílio, e a todos os outros colegas e amigos cujo nome me fogem da memória neste momento.

Ao analista de software **Alexandre Niero**, por nos auxiliar na utilização de equipamentos de informática e desenvolvimento dos programas C++.

À **CAPES - Conselho de Apoio ao Estudo e Pesquisa**, Pela bolsa de auxílio Educação.

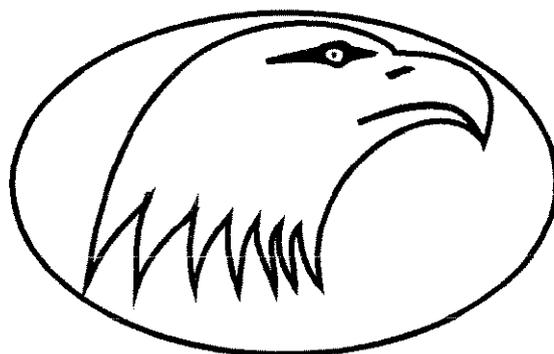
À **UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas** por oferecer a infra-estrutura adequada para realização deste Trabalho

Ao **DSCE -** Por nos ceder durante todos estes anos os laboratórios de informática e robótica.

Ao **CNPq - RHAÉ**, que financiou diversos equipamentos utilizados neste trabalho, incluindo a construção do manipulador JECA II, que serviu de exemplo para sustentação deste trabalho.

Ao **Prof. Ariovaldo Venâncio Garcia** do DSEE, que através do Projeto 90/3940-0 da FAPESP Fundação de Apoio a Pesquisas do Estado de São Paulo, nos possibilitou o uso e aprendizado do software Mathematica™ no início deste trabalho.

Epígrafe



**Mas os que esperam no Senhor
renovam as suas forças,
sobem com asas como águias,
correm e não se cansam,
caminham e não se fatigam.
Is 40:31**

Glossário

Acionamento direto: é o acionamento em que o motor é acoplado diretamente na junta, sem a mediação de algum dispositivo de redução, transmissão ou conversão de movimento.

Acionamento indireto: é o acionamento em que o motor é acoplado na junta acionada, através de algum dispositivo mecânico, seja de redução, transmissão ou conversão de movimento.

Acionamento indireto reduzido: é o acionamento indireto através de um dispositivo mecânico de redução de velocidade

Acionamento indireto não reduzido: é o acionamento indireto através do qual o movimento e esforço é transferido para a carga através de um dispositivo transmissor mecânico sem que haja redução de velocidade.

Acionamento indireto conversor: é o acionamento indireto através do qual o movimento produzido pelo motor é transferido para a carga através de um dispositivo transmissor mecânico que o converte de movimento prismático ou linear para movimento rotacional ou vice e versa.

Acopladores: Dispositivos que acoplam os motores em suas cargas (em termos de manipuladores, as juntas), para transferência, conversão ou simples transmissão de energia, torque ou velocidade.

Estratégia SIMUL: Estratégia de seleção de atuadores onde se emprega o **Modelo SIMUL**.

Estratégia JECA: Estratégia de seleção de atuadores onde se emprega o **Modelo JECA**.

Estratégia SHNEY I: Estratégia de seleção de atuadores onde se emprega uma variedade do **Modelo SHNEY**.

Estratégia SHNEY II: Estratégia de seleção de atuadores onde se emprega uma variedade do **Modelo SHNEY**.

Fator de aquecimento: é o Fator de acoplamento para o aquecimento - $f(N)$, é o fator que modifica a taxa de aquecimento de carga máxima em função do grau de aquecimento e do resíduo, determinando a taxa de aquecimento do acoplamento.

Fator de acoplamento: veja **Grau de acoplamento**.

Grau de acoplamento: $G(N)$, é o fator que modifica a taxa de potência de carga máxima, determinando a taxa de acoplamento para cada junta.

Grau de acoplamento em vista do aquecimento: veja **Grau de aquecimento**

Grau de aquecimento: $h(N)$, é o fator que modifica a taxa de aquecimento e o fator de aquecimento, em função da taxa de acoplamento ou redução.

Modelo GERAL: é a Modelo do processo de seleção de atuadores que usa a representação generalizada do torque de carga.

Modelo JECA: é a modelo do processo de seleção de atuadores que usa a representar o torque de carga em função dos parâmetros cinemáticos de carga, complementados pelas variáveis de juntas do sistema.

Modelo SIMUL: é a Modelo do processo de seleção de atuadores que emprega a simulação dinâmica para determinar os parâmetros, que compõem a equação do torque de pico, que é importante para analisar a capacidade de carga do motor, o que aumenta a precisão da resposta

Modelo SIMUL-GERAL: é a Modelo SIMUL que emprega a representação generalizada dos torques de carga para definir o torque máximo.

Modelo SIMUL-JECA: é a Modelo SIMUL que emprega os parâmetros cinemáticos de carga, para definir o torque máximo aplicado no motor.

Modelo SIMUL-SHNEY: é a Modelo SIMUL que emprega os parâmetros dinâmicos separados em uma parcela dos termos inércias, e outra dos termos não inerciais de carga, para definir o torque máximo aplicado no motor

Modelo SIMUL-TIVE: é a Modelo SIMUL que emprega os parâmetros dinâmicos separados em uma parcela dos componentes inércias, uma parcela dos componentes de atrito viscoso, e outra como o resto dos do torque de carga, para definir o torque máximo aplicado no motor

Modelo SHNEY: é a Modelo do processo de seleção de atuadores que usa a representar o torque de carga em função direta dos parâmetros dinâmicos do sistema, duas parcelas, uma dos componentes de natureza inercial, e outra composta dos elementos de natureza não inercial, considerado-as como perturbação externa.

Modelo TIVE: é a Modelo do processo de seleção de atuadores que usa a representar o torque de carga em função direta dos parâmetros dinâmicos do sistema, três partes uma de natureza inercial, outra de natureza viscosa, e outra que aglomera o resto como uma perturbação externa.

Motor comercial: é o motor, cujos parâmetros são representados nos catálogos comerciais, cujo tratamento do modelo dinâmico representa o torque mecânico dissipativo internamente, discriminando a natureza de suas componentes, tais como torque inercial, torque de atrito viscoso, e talvez torque de atrito seco.

Motor convencional: é o mesmo que o motor elétrico de corrente contínua comercial.

Motor genérico: é o motor cujo tratamento do modelo dinâmico representa o torque genericamente independente da natureza de suas forças componentes.

Motor ideal: é o motor elétrico de corrente contínua, cuja dissipação de energia mecânica interna ocorre exclusivamente devido ao torque de natureza inercial, ou inércia do eixo, considerando os torque devido aos atritos secos e viscosos desprezíveis.

Motor real: é o mesmo que o motor elétrico de corrente contínua comercial.

Taxa de potência: Parâmetro modernamente usados e que permitem avaliar o desempenho do motor para acionar uma determinada carga, independente do sinal do torque eletromagnético de entrada resultante.

Taxa de potência de carga: é a taxa de potência de carga, para qual se consegue o máximo torque eletromagnético do motor, que deve ser a mínima taxa de potência de acoplamento. Nunca deve superar a taxa de potência do motor.

Taxa de potência do acoplamento: é a taxa de potência que define as possibilidades de determinar um acoplador entre um motor e uma carga. Usada para definir limites da taxa de acoplamento.

Taxa de potência do motor: é a taxa de potência fornecida pelo fabricante do motor, e define a máxima taxa de potência que este motor pode enviar direta ou indiretamente a uma carga.

Taxa de aquecimento: é um outro parâmetro definido para avaliar analiticamente o aquecimento do motor, para acionar uma determinada carga, independente do sinal do torque eletromagnético de entrada resultante.

Taxa de aquecimento de carga: é a taxa de aquecimento de carga, para qual se consegue o máximo torque eletromagnético do motor, que deve ser a mínima taxa de potência de acoplamento. Nunca deve superar a taxa de potência do motor.

Taxa de aquecimento do acoplamento: é a taxa de aquecimento que define as possibilidades de determinar um acoplador entre um motor e uma carga, frente a suas capacidades térmicas. Usada para definir limites da taxa de acoplamento.

Taxa de aquecimento do motor: é a taxa de aquecimento calculada através de parâmetros dos motores fornecidos pelos fabricantes através dos catálogos dos motores, juntamente com algumas condições térmicas ambientais.

Taxa de acoplamento do aquecimento: é a taxa de redução para que a taxa de aquecimento seja mínima.

Taxa de acoplamento de carga: é a taxa de redução em para que a taxa de potência seja mínima.

Torque virtual do motor: todo torque dissipativo mecânico de um motor com uma junta acoplada, representado como se o motor estivesse funcionando em vazio, e com a velocidade da carga, independente do acoplador.

Variáveis contínuas: Variáveis usadas em sistemas analíticos, e que mudam continuamente no tempo, tendo uma representação para cada ponto no domínio do tempo que pertence ao conjunto dos números irracionais positivos.

Variáveis discretas: Variáveis usadas em sistemas digitais ou métodos numéricos, e que são amostradas discretamente no tempo, tendo uma representação para os pontos do domínio do tempo, que pertencem ao conjunto dos números naturais positivos.

Simbologia

1	- No quarto nível da classificação de manipuladores, indica que o rotor do motor daquela posição está apoiado no elo 1 da cadeia cinemática.
2	- No quarto nível da classificação de manipuladores, indica que o rotor do motor daquela posição está apoiado no elo 2 da cadeia cinemática.
3	- No quarto nível da classificação de manipuladores, indica que o rotor do motor daquela posição está apoiado no elo 3 da cadeia cinemática..
α_i	. Ângulo de rotação fixo de Denavit Hartenberg.
$\Delta\theta$	- Diferença entre a temperatura de operação do motor, e a do ambiente de operação.
$\Delta\theta_{max}$	- Máxima diferença entre a temperatura máxima de operação
Δt	- Veja também Δt_i .
Δt_i	- Variação de tempo entre duas amostragens consecutivas
Δq_i	- Queda de velocidade do motor por causa do carregamento em <i>rpm</i>
$\Delta \dot{q}_i$	- Variação de velocidade
$\phi_k(q)$	- Torque devido a contribuição da presença do campo gravitacional da terra.
η	- Rendimento de um acoplamento reduzido ou não.
θ	- Ângulo entre fasor das coordenadas do CME e o eixo x do SCE.
θ_{amb}	- Temperatura do ambiente de operação.
θ_{ab}	- Temperatura na armadura do motor em regime permanente
θ_{max}	- Temperatura máxima de operação do motor (ver catálogo do motor).
θ_v	- Diferença de temperatura entre o rotor do motor e o ambiente, para operação em regime permanente.
$\dot{\theta}_{pm}$	- Velocidade máxima do motor fornecida pelo seu catálogo.
$\dot{\theta}_p$	- Aceleração máxima imposta pela carga através do motor.
$\ddot{\theta}_{pm}$	- Aceleração máxima do motor fornecida pelo seu catálogo.
$\ddot{\theta}_p$	- Velocidade máxima imposta pela carga através do motor.
τ_m	- Constante eletromecânica do motor.
τ_θ	- Constante térmica.
ψ_{cu}	- Coeficiente de temperatura do cobre do motor
ω	- Vetor das velocidades rotacionais da junta i .
\dot{A}	- Taxa de aquecimento ou taxa de potência de aquecimento (generalizada).
a	- Coordenadas do BFA referida ao SCE.
a	- Altura de uma barra.
a_i	- Comprimento fixo do elo i .
A_i	- Na classificação de manipuladores, Indica local reservado para o tipo de articulação da junta de ordem i .

A_i	- Veja também A_i^{i+1} .
A_i^{i+1}	- Matriz de transformação homogênea de elementos do sistema de coordenadas de um elo $(i+1)$ para o sistema de coordenadas do elo vizinho i , definida por Denavit Hartenberg.
\dot{A}_{ac}	- Taxa de aquecimento para o acoplamento.
$\dot{A}_{ak}(i)$	- Taxa de aquecimento para o acoplamento, para motor genérico, numa i -ésima amostragem.
$\dot{A}_{ak}(ii)$	- Taxa de aquecimento para o acoplamento, para motor ideal, numa i -ésima amostragem.
\dot{A}_{ck}	- Taxa de aquecimento da carga.
$\dot{A}_{ac}(i)$	- Taxa de aquecimento da carga, para motor genérico, numa i -ésima amostragem.
$\dot{A}_{ac}(ii)$	- Taxa de aquecimento da carga, para motor genérico, numa i -ésima amostragem.
\dot{A}_M	- Taxa de aquecimento para o motor (calculada a partir de parâmetros do catálogo do motor).
Atuador	Componente 1 mais Componente 2.
B	- No quarto nível da classificação de manipuladores, indica que o eixo do motor que aciona aquela junta está integrado na base do manipulador.
b	- Largura de uma barra.
$B1$	- Massa total acionada pelo eixo da junta 1, da cadeia cinemática de um manipulador.
$B2$	- Massa total acionada pelo eixo da junta 2, da cadeia cinemática de um manipulador.
$B3$	- Massa total acionada pelo eixo da junta 3, da cadeia cinemática de um manipulador.
BFA	- Base de fixação do conjunto de atuadores referido ao SCA.
B_i	- Massa total acionada pelo eixo da junta genérica (i) , da cadeia cinemática de um manipulador.
B_m	- Constante de viscosidade do motor.
C	- Capacidade térmica da armadura do motor.
C	- Coordenadas do CMR referida ao SCE (no capítulo 2).
$\cos\alpha_i$	- Ver $\cos\alpha_i$.
$C1$	- Massa do contra-peso do elo 1, da cadeia cinemática de um manipulador.
$C1$	- Na seção 2.8, capacidade do motor da junta 1, da cadeia cinemática de um manipulador.
C_1	- Coordenadas do CM1 referida ao SCA.
$C2$	- Massa do contra-peso do elo 2, da cadeia cinemática de um manipulador.
$C2$	- Na seção 2.8, capacidade do motor da junta 2, da cadeia cinemática de um manipulador.
C_2	- Coordenadas do CM2 referida ao SCA.
$C3$	- Massa do contra-peso do elo 3, da cadeia cinemática de um manipulador.
$C3$	- Na seção 2.8, capacidade do motor da junta 3, da cadeia cinemática de um manipulador.
C_a	- Coordenadas do CMR referida ao SCE.
C_e	- Coordenadas do CME referida ao SCE.
C_i	- Massa do contra-peso do elo genérica (i) , da cadeia cinemática de um manipulador.
C_i	- No quarto nível da classificação de manipuladores, indica que o eixo do motor que aciona aquela junta está apoiado na haste do contra-peso do elo i .
C_i	- Na seção 2.8, capacidade do motor da junta genérica (i) , da cadeia cinemática de um manipulador.
$c_{ijk}(q, \dot{q})$	- Símbolo de Christoffel.
$c_{ijkp}(q, \dot{q})$	- Valor de pico do símbolo de Christoffel.
CM1	- Centro de massa do atuador 1 referido ao SCA.
cm_1	- Centro de massa do componente 1 referido ao SCE.

CM2	- Centro de massa do atuador 2 referido ao SCA.
cm_2	- Centro de massa do componente 2 referido ao SCE.
CMA	- Centro de massa do conjunto do atuador referido ao SCA.
CME	- Centro de massa original do elo referido ao SCE.
CMR	- Centro de massa do elo após a recomposição referido ao SCE.
$C(q, \dot{q})$	- Representação matricial dos coeficientes de Christoffel.
Componente 1	- Parte 1 do atuador referido ao SCA, (motor ou rotor)
Componente 2	- Parte 2 do atuador referido ao SCA, (reductor ou estator)
$\cos\alpha_i$	- Coseno do ângulo α_i .
D	- No terceiro nível da classificação de manipuladores, indica acionamento direto.
\mathbf{d}	- Representa o vetor com as coordenadas da ponta do elemento terminal referidas ao sistema inercial.
d	- Coordenadas do CMA referida ao SCA.
d_1	- Distância entre CM1 e CMA referida ao SCA.
d_2	- Distância entre CM2 e CMA referida ao SCA.
da	- Distância entre o CMA e o CMR referida ao SCE.
db	- Distância entre BFA ou centro do SCA e o CMR referida ao SCE.
de	- Distância entre o CME e o CMR referida ao SCE.
d_i	- Deslocamento do um elo ao longo do eixo de Denavit Hartenberg.
d_{kk}	- Momento de inércia variante de uma junta.
d_{kkp}	- Valor de pico do momento de Inércia de uma junta.
d_n	- Comprimento do elemento terminal referenciado ao sistema de coordenadas da última junta.
$D(q)$	- Matriz dos termos inerciais.
E	- Consumo de energia na realização da tarefa.
E	- Eixo da junta de um elo isolado.
$E1$	- Elo acionado pela junta 1, da cadeia cinemática de um manipulador.
$E2$	- Elo acionado pela junta 2, da cadeia cinemática de um manipulador.
$E3$	- Elo acionado pela junta 3, da cadeia cinemática de um manipulador.
E_i	- Elo acionado pela junta genérica (i), da cadeia cinemática de um manipulador.
E_i	- Na classificação de manipuladores, é o local reservado para o tipo de estrutura do elo acionado pela junta de ordem i .
ELO	- Elemento de apoio ou fixação dos atuadores na cadeia cinemática.
E_{max}	- Máximo consumo de energia na realização da tarefa.
E_t	- Representação da tensão terminal de um motor com carga genérica
E_o	- Representação da tensão terminal de um motor descarregado
E_p	- Representação da tensão terminal de um motor com carga de pico
F	- Massa de uma ferramenta colocada no elemento final de um manipulador.
f_3	- <i>Off-set</i> do grau de acoplamento frente ao aquecimento para motor convencional.
$f_3(i)$	- <i>Off-set</i> do grau de acoplamento frente ao aquecimento para motor convencional, obtido numa i -ésima amostragem.
$f_{3i}(i)$	- <i>Off-set</i> do grau de acoplamento frente ao aquecimento em motor ideal, numa i -ésima amostragem.
f_{3i}	- <i>Off-set</i> do grau de acoplamento frente ao aquecimento para torque motor inercial e inércia de carga variante.
f_{3ii}	- <i>Off-set</i> do grau de acoplamento frente ao aquecimento para torque motor inercial e inércia de carga constante.
F_{ck}	- Força produzida por uma junta prismática
F_f	- Força no final do perfil de distribuição de forças de uma barra.

F_i	- Força no começo do perfil de distribuição de forças de uma barra.
$f_i(N)$	- Grau de acoplamento para aquecimento mínimo com motor convencional.
$F_{ii}(N)$	- Grau de acoplamento para aquecimento mínimo com torque motor inercial e inércia de carga variante.
F_m	- Força eletromagnética linear total produzida por motor linear
F_{mo}	- Forças de dissipação mecânica produzidas internamente em um motor linear
$f(N)$	- Grau de acoplamento para aquecimento mínimo com torque motor inercial e inércia de carga constante.
$f(N,i)$	- Grau de acoplamento para aquecimento mínimo para motor convencional, numa i-ésima amostragem qualquer.
$f_i(N,i)$	- Grau de acoplamento para aquecimento mínimo para motor ideal, numa i-ésima amostragem qualquer.
F_n	- Força aplicada no extremo oposto ao ponto de apoio de um elo ou barra.
g	- Aceleração gravitacional local.
\mathbf{g}	- Vetor da aceleração gravitacional local.
G	- Soma dos momentos de gravidade em torno do eixo da juta de um eixo isola.
G_t	- Torque devido a ação gravitacional
$G(N)$	- Grau ou fator de acoplamento genérico entre motor e carga
$G_i(N)$	- Fator de acoplamento do motor com a carga para motor convencional
$G_x(N)$	- Fator de acoplamento entre motor e carga para motor ideal, obtido por simulação dos componentes.
$G(N_i,ip)$	- Fator de acoplamento entre motor e carga para motor convencional, obtido por estimação e variáveis discretas.
$G(N,ip)$	- Fator de acoplamento entre o motor a carga para motor ideal obtido por estimação e variáveis discretas.
$G(N,ix)$	- Fator de acoplamento entre o motor a carga para motor convencional obtido por simulação e variáveis discretas.
$G(q)$	- Matriz do torques devido a aceleração gravitacional da terra.
\mathbf{g}^T	- Transposto do vetor da aceleração gravitacional local.
H	- Espessura de uma plataforma de acoplamento de um elo isolado.
$h_i(N)$	- Fator de acoplamento para aquecimento mínimo para motor convencional.
$h_{ii}(N)$	- Fator de acoplamento para aquecimento mínimo para torque motor inercial e inércia de carga variante.
$h(N)$	- Fator de acoplamento para aquecimento mínimo para torque motor nercial e inércia de carga constante.
$h(N,i)$	- Fator de acoplamento para aquecimento mínimo, com motor convencional, numa i-ésima amostragem qualquer.
$h_i(N,i)$	- Fator de acoplamento para aquecimento mínimo, com motor ideal, numa i-ésima amostragem qualquer.
$i(t)$	- Veja também i
i	- ou $i(t)$ Corrente instantânea na armadura do motor.
i	- Ordem de uma iteração genérica.
(I)	- Ordem genérica de uma iteração, para variáveis discretas.
\tilde{I}	- Corrente eficaz na armadura do motor.
I	- No terceiro nível da classificação de manipuladores, indica estrutura indireto.
I	- Corrente elétrica de um motor com carga genérica
I	- Matriz genérica dos fasores de inércia (no capítulo 2).
I_j	- Matriz dos fasores de inércia de um elo genérico (i).
\tilde{I}	
I_{max}	- Valor máximo da corrente eficaz na armadura do motor.
I_o	- Corrente elétrica de um motor descarregado

I_p	- Corrente elétrica de um com carga de pico
I_p	- Corrente de pico na armadura do motor.
i_x	- Ordem da iteração em que o produto de torque é máximo, para variáveis discretas.
I_x	- Corrente elétrica de um motor com carga máxima da junta
$J\omega$	- Matriz Jacobiana para determinação da para a velocidade rotacional
$J\omega_i$	- Jacobiano rotacional da junta 1
$J_{\omega i}(q)$	- Vetor de inércia rotacional do elo i .
$J1$	- Junta 1, da cadeia cinemática de um manipulador.
J	- Momento de inércia do componente 1 em torno do seu eixo em CM1.
$J2$	- Junta 2, da cadeia cinemática de um manipulador.
J_2	- Momento de inércia do componente 2 em torno do seu eixo em CM2.
$J3$	- Junta 3, da cadeia cinemática de um manipulador.
J_i	- Junta genérica (i), da cadeia cinemática de um manipulador.
J_A	- Momento de inércia do atuador composto em torno do seu eixo em CMA.
J_{Ae}	- Momento de inércia do atuador composto em CMA em torno de um eixo paralelo ao da junta.
J_{ck}	- Momento de inércia constante de uma carga típico de uma junta prismática
Jd	- Deslocamento de J_{Ae} para o CMR.
J_E	- Momento de inércia original do elo em CME.
J_{Ee}	- Momento de inércia do elo isolado deslocado para CMR.
J_i	- Na classificação de manipuladores, é o local reservado para o tipo da junta de ordem i .
JJ_e	- Momento de inércia do elo em torno do seu eixo.
J_m	- Momento de inércia do motor.
J_R	- Momento de inércia resultante após a fusão do elo com o atuador.
$J_{vel}(q)$	- Vetor de inércia translacional do elo i .
Jv	- Matriz Jacobiana para determinação da velocidade translacional
Jv	- Jacobiano translacional da junta 1
Jx	- Matriz Jacobiana para determinação das velocidades translacional e rotacional
k	- Vetor unitário contendo a direção do punho referido ao seu sistema de coordenadas.
k	- Constante ou sensibilidade de torque do motor.
Ke	- É a constante de força contraeletromotriz, retirada do catálogo do motor.
Kt	- Constante de torque do motor
Ktp	- Constante de constante de torque do motor com torque de pico
l	- Comprimento da haste de ação de um elo isolado.
$l1$	- Comprimento do elo 1, da cadeia cinemática de um manipulador.
$l2$	- Comprimento do elo 2, da cadeia cinemática de um manipulador.
$l3$	- Comprimento do elo 3, da cadeia cinemática de um manipulador.
l_i	- Comprimento do elo genérico (i), da cadeia cinemática de um manipulador.
M	- Massa da haste de ação desprezando o contra-peso de um elo isolado.
m	- Representação genérica de massa, ou pode ser massa do motor
$M1$	- Motor ou Massa do moto da junta 1, da cadeia cinemática de um manipulador.
$m1$	- Massa da haste de ação do elo 1, da cadeia cinemática de um manipulador.
m_1	- Massa do componente 1 do atuador, (rotor ou motor).
$M2$	- Motor ou Massa do moto da junta 2, da cadeia cinemática de um manipulador.
$m2$	- Massa da haste de ação do elo 2, da cadeia cinemática de um manipulador.
m_2	- Massa do componente 2 do atuador, (estator ou redutor).
$M3$	- Motor ou Massa do moto da junta 3, da cadeia cinemática de um manipulador.
$m3$	- Massa da haste de ação do elo 3, da cadeia cinemática de um manipulador.
M_i	- Motor ou Massa do moto da junta genérica (i), da cadeia cinemática de um manipulador.
$m_A=m_1 + m_2$	- Massa total do atuador (motor).

$max(c_{ijk})$	- Amostragem máxima do parâmetro c_{ijk} medido no período de execução da tarefa.
$max(d_{kk})$	- Amostragem máxima do parâmetro d_{kk} medido no período de execução da tarefa.
$max(\ddot{q}_k)$	- Amostragem máxima do parâmetro \ddot{q}_k medido no período de execução da tarefa.
$max(\dot{q}_k)$	- Amostragem máxima do parâmetro \dot{q}_k medido no período de execução da tarefa.
$max(N)$	- Amostragem máxima do parâmetro N medido no período de execução da tarefa.
$max(T_{ck})$	- Amostragem máxima do parâmetro T_{ck} medido no período de execução da tarefa.
$max(T_{in})$	- Amostragem máxima do parâmetro T_{in} medido no período de execução da tarefa.
$max(T_m)$	- Amostragem máxima do parâmetro T_m medido no período de execução da tarefa.
$max(T_{mc})$	- Amostragem máxima do parâmetro T_{mc} medido no período de execução da tarefa.
$max(T_{nx})$	- Amostragem máxima do parâmetro T_{nx} medido no período de execução da tarefa.
$max(T_{pk})$	- Amostragem máxima do parâmetro T_{pk} medido no período de execução da tarefa.
$max(T_{vis})$	- Amostragem máxima do parâmetro T_{vis} medido no período de execução da tarefa.
m_e	- Massa do elo.
MI	- Motor que aciona a junta i .
M_i	- Na classificação de manipuladores, Indica local reservado para o tipo de motor que aciona junta de ordem i .
M_f	- Momento fletor no final do perfil de distribuição de forças de uma barra.
M_i	- Momento fletor no começo do perfil de distribuição de forças de uma barra.
mi	- Massa do elo ou da haste de ação do elo genérico (i), da cadeia cinemática de um manipulador.
m_R	- Massa resultante do conjunto após a fusão do elo com o atuador.
N	- Taxa de redução ou de acoplamento reduzido.
n	- No capítulo 3, Número de graus de liberdades do manipulador.
n	- Relação entre os comprimentos das hastes de ação e compensação de um elo isolado (no capítulo 2).
$n1$	- Relação entre o comprimento da haste de ação e haste de compensação do elo 1, da cadeia cinemática de um manipulador.
$n2$	- Relação entre o comprimento da haste de ação e haste de compensação do elo 1, da cadeia cinemática de um manipulador.
$n3$	- Relação entre o comprimento da haste de ação e haste de compensação do elo 1, da cadeia cinemática de um manipulador.
N_a	- Taxa de redução para Taxa de aquecimento mínima.
Na	- Taxa de redução para taxa de aquecimento mínima.
$N_{a(i)}$	- Limite inferior para a taxa de acoplamento para o critério da análise da taxa de aquecimento.
$N_{a''(i)}$	- Limite inferior para a taxa de acoplamento para o critério da análise da taxa de aquecimento, quando houver refrigeração forçada.
N_{ai}	- Taxa de redução para Taxa de aquecimento mínima quando a dissipação mecânica no motor for puramente inercial.
$N_a(i)$	- Taxa de redução para Taxa de aquecimento mínima para motor convencional, numa i -ésima amostragem.
$N_{ai}(i)$	- Taxa de redução para Taxa de aquecimento mínima para motor ideal, numa i -ésima amostragem.
$N_{a(f)}$	- Limite superior para a taxa de acoplamento para o critério da análise da taxa de aquecimento.

$N_{a^{(f)}}$	- Limite superior para a taxa de acoplamento para o critério da análise da taxa de aquecimento, quando houver refrigeração forçada.
n_c	- Velocidade de carga em rpm
N_c	- Taxa de redução para taxa de potência de carga mínima, para motor ideal com variáveis amostradas.
$N_{c(i)}$	- Limite inferior para a taxa de acoplamento para o critério da análise da taxa de potência.
$N_{c(f)}$	- Limite superior para a taxa de acoplamento para o critério da análise da taxa de potência.
ni	- Relação entre o comprimento da haste de ação e haste de compensação do elo genérico (i), da cadeia cinemática de um manipulador (capítulo 2).
Ni	- Taxa de redução para taxa de potência de carga mínima, para motor convencional com variáveis amostradas.
Nix	- Taxa de redução para taxa de potência de carga mínima, para motor convencional, amostrado no instante do torque motor máximo.
Np	- Taxa de redução para taxa de potência de carga mínima, determinada usando-se parâmetros de pico para dissipação mecânica no motor genérica.
Nf	- Taxa de redução final do domínio.
Npi	- Taxa de redução para taxa de potência de carga mínima, determinada usando-se parâmetros de pico para dissipação mecânica no motor inercial.
N_o	- Velocidade do motor vazio em [rpm]
No	- Taxa de redução inicial do domínio.
Nx	- Taxa de redução para taxa de potência de carga mínima, medida no instante do produto de torque máximo.
Nxi	- Taxa de redução para taxa de potência de carga mínima, medida no instante do produto de torque máximo, para motor ideal (eixo puramente inercial).
$Ninx$	- Taxa de redução para taxa de potência de carga mínima, medida no instante do produto de torque máximo, para carga e eixo do motor puramente inercial.
o_i	- Vetor que representa as coordenadas dos centros de massas do elo i , referido à base.
P	- Indica que a junta da cadeia de posicionamento de um robô é do tipo prismática.
P	- No primeiro nível da classificação de manipuladores, indica elo com a estrutura paralela.
P	- No segundo nível da classificação de manipuladores, indica junta do tipo prismática.
$P1$	- Peso do motor da junta 1, da cadeia cinemática de um manipulador.
$P2$	- Peso do motor da junta 2, da cadeia cinemática de um manipulador.
$P3$	- Peso do motor da junta 3, da cadeia cinemática de um manipulador.
Pa	- Perda na resistência da armadura em função do acoplamento (efeito joule).
\dot{P}_{ac}	- Taxa de potência do acoplamento.
\dot{P}_{cat}	- Taxa de potência do motor (fornecida ou calculada através dos catálogos).
Pc	- Perda ou potência máxima gerada no motor em função da carga.
p_c	- Representa o vetor que contém a posição do punho referenciado ao sistema inercial (capítulo 2)..
\dot{P}_{ck}	- Taxa de potência da carga (representação geral).
Pi	- Peso do motor da junta genérica (i), da cadeia cinemática de um manipulador.
Pm	- Perda máxima na resistência da armadura do motor (fornecida em catálogo).
PPP	- Indica que o robô é do tipo cartesiano e a cadeia de posicionamento possui três juntas do tipo prismática.
q_i	- Ângulo entre dois elos consecutivos de Denavit Hartenberg.
\ddot{q}_m	- Aceleração instantânea da carga referida ao lado do motor.

\ddot{q}_k	- Aceleração instantânea de uma junta robótica k .
$\ddot{q}_{k(i)}$	- Valor da aceleração de uma junta robótica k , numa i -ésima amostragem qualquer.
$\tilde{\ddot{q}}_k$	- Valor eficaz da aceleração de uma junta robótica k .
$\dot{q}_{k(ix)}$	- Aceleração de uma junta robótica k , amostrada no instante do torque motor máximo.
\ddot{q}_{kp}	- Valor de pico da aceleração de uma junta robótica k .
\dot{q}_{kx}	- Aceleração de uma junta robótica k , medida no instante do produto de torque máximo.
\dot{q}_k	- Velocidade instantânea da carga referida ao lado do motor.
\dot{q}_k	- Velocidade instantânea de uma junta robótica k .
$\tilde{\dot{q}}_k$	- Valor eficaz da velocidade de uma junta robótica k .
$\dot{q}_{k(i)}$	- Valor da velocidade de uma junta robótica k , numa i -ésima amostragem.
$\dot{q}_{k(ix)}$	- Velocidade de uma junta robótica k , amostrada no instante do torque motor máximo.
\dot{q}_{kp}	- Valor de pico da velocidade de uma junta robótica k .
\dot{q}_{kx}	- Velocidade de uma junta robótica k , medida no instante do produto de torque máximo.
R	- No capítulo 1, indica que a junta da cadeia de posicionamento de um robô é do tipo rotacional.
R	- No segundo nível da classificação de manipuladores, indica junta do tipo rotacional.
R	- veja também R_a
R_a	- Resistência elétrica da armadura de um motor de CC.
R_i	- Redutor que aciona a junta i
Rot_{z,q_i}	- Matriz de transformação homogênea que representa uma rotação angular q_i em torno de um eixo z de um sistema de coordenadas.
Rot_{x,α_i}	- Matriz de transformação homogênea que representa uma rotação angular α_i em torno de um eixo x de um sistema de coordenadas.
$Trans_{z,d_i}$	- Matriz de transformação homogênea que representa uma translação linear d_i . Ao longo do eixo z de um sistema de coordenadas.
$Trans_{x,a_i}$	- Matriz de transformação homogênea que representa uma translação linear a_i . Ao longo do eixo x de um sistema de coordenadas.
R	- Na página 19, matriz de orientação do elemento terminal relativa à base.
R_0^{3T}	- É o transposto da matriz de rotação do elo 3 na base.
R_n^3	- É função das variáveis de juntas da cadeia de orientação.
R_0^n	- É a matriz de orientação do elemento final.
R_p	- Resistência elétrica da armadura do motor para torque de pico no eixo
RPP	- Indica que o robô é do tipo cilíndrico e a cadeia de posicionamento possui uma juntas do tipo prismática e duas do tipo rotacional.
R_q	- Resistência elétrica da armadura do motor, em regime permanente, devido ao aquecimento
RRP	- Indica que o robô é do tipo esférico e a cadeia de posicionamento possui duas juntas do tipo prismática e uma do tipo rotacional.
RRR	- Indica que o robô é do tipo articulado e a cadeia de posicionamento possui três juntas do tipo rotacional.
R_θ	- Resistência térmica do motor.

R_x	- Resistência elétrica da armadura do motor para torque de carga máximo
R_i	- Matriz de orientação de um elo (i) no elo ($i-1$).
r_{cm}	- Coordenadas do centro de massa.
$R_i(q)$	- Matriz de orientação de um elo (i) referidos à base.
$R_i(q)^T$	- Matriz de orientação de um elo (i) referidos à base.
S	- No primeiro nível da classificação de manipuladores, indica elo com a estrutura simples.
$sen\alpha_i$	ver $sen\alpha_i$
SCA_1	- Sistema de coordenadas cartesianas do componente 1 do atuador, veja SCA.
SCA_2	- Sistema de coordenadas cartesianas do componente 2 do atuador, veja SCA.
SCE	- Sistema de coordenadas cartesianas do elo.
SCA	- Sistema de coordenadas cartesianas do conjunto atuador, e que coincide com SCA_1 e SCA_2 no cada dos motores CC.
$sen\alpha_i$	- Seno do ângulo α_i
Sol_A	- Solução do sistema para a taxa de potência.
Sol_B	- Solução resposta do sistema para a taxa de aquecimento.
Sol_B^*	- Solução do sistema para a taxa de aquecimento quando o motor possui refrigeração forçada.
Sol_C	- Interseção das soluções anteriores.
Sol_D	- Solução do sistema para as velocidades.
Sol_E	- Solução do sistema para as acelerações.
Sol_F	- Interseção de todas as soluções obtidas.
T	- Representação genérica do torque do motor
$T1$	- Massa total acionado pelo motor da junta 1, da cadeia cinemática de um manipulador.
$T2$	- Massa total acionado pelo motor da junta 2, da cadeia cinemática de um manipulador.
$T3$	- Massa total acionado pelo motor da junta 3, da cadeia cinemática de um manipulador.
T_a	- Torque na saída do eixo do motor.
T_{carga}	- Torque instantâneo de carga genérico.
T_{ck}	- Torque instantâneo de uma junta.
$T_{ck}(ix)$	- Torque de uma junta, amostrado no instante do torque motor máximo.
\tilde{T}_{ck}	- Torque eficaz de uma junta.
$T_{ck}(i)$	- Torque de uma junta k , numa i -ésima amostragem.
T_{ckp}	- Valor de pico do Torque de uma junta.
T_{ckx}	- Torque de uma junta medido no instante do produto de torque máximo.
T_{ek}	- Torque instantâneo da junta excluindo os torques inercial e viscoso próprio da junta.
$T_{ek}(ix)$	- Torque da junta excluindo os torques inercial e viscoso, amostrado no instante do torque motor máximo.
$T_{ek}(i)$	- Torque da junta excluindo os torques inercial e viscoso para a junta k , numa i -ésima amostragem qualquer.
T_{ekp}	- Valor de pico do torque da junta excluindo os torques inercial e viscoso próprio da junta.
T_{ekv}	- Torque instantâneo da junta excluindo os torques inercial próprio da junta.
$T_{ekv}(ix)$	- Torque instantâneo da junta excluindo o torque inercial próprio da junta k , amostrado no instante do torque máximo do motor.
$T_{ekv}(i)$	- Torque instantâneo da junta excluindo o torque inercial próprio da junta k , numa i -ésima amostragem.
T_{ekvp}	- Valor de pico do torque da junta excluindo os torques inercial próprio da junta.
T_{ekvx}	- Torque não inercial próprio da junta, medido no instante do produto de torque máximo.
t_f	- Tempo de duração do regime transitório.
T_{fm}	- Torque instantâneo de atrito seco do motor.
T_{fk}	- Torque instantâneo de atrito seco da carga.
T_i	- Massa total acionado pelo motor da junta genérica (i), da cadeia cinemática de um manipulador.

T_{in}	- Torque inercial instantâneo da junta.
$T_{in}(ix)$	- Torque inercial da junta, amostrado no instante do torque motor máximo.
\tilde{T}_{in}	- Torque inercial eficaz da junta.
T_{imp}	- Valor de pico do torque inercial da junta.
T_{inx}	- Torque inercial da junta no instante do produto de torque de pico.
T_{IX}	- Transmissão que aciona a junta i localizada no elo x .
T_k	- Vetor genérico dos esforços (torque ou forças) nas juntas de um manipulador.
T_k^i	- Matriz de transformação homogênea de elementos do sistema de coordenadas de um elo (i) para o sistema de coordenadas de um elo qualquer k , definida por Denavit Hartenberg.
\tilde{T}_m	- Torque eletromagnético eficaz do motor para a junta k .
T_m	- veja $T_m(t)$.
T_{mc}	- Torque virtual do motor instantâneo para a junta k .
$T_{mc}(i)$	- Torque virtual do motor para a junta k , numa i -ésima amostragem.
$T_{mc}(ix)$	- Torque virtual do motor para a junta k , amostrado no instante do torque motor máximo.
\tilde{T}_{mc}	- Valor eficaz do torque virtual do motor para a junta k .
T_{mcp}	- Valor de pico do torque virtual do motor.
T_{mcx}	- Torque virtual do motor, obtido no instante do produto de torque máximo.
$\tilde{T}_m^2(i)$	- Valor eficaz do torque eletromagnético do motor para a junta k , calculado para uma i -ésima amostragem.
T_{mo}	- Torque de natureza dissipativa mecânica, de um motor.
T_{mp}	- Valor de pico do torque eletromagnético do motor.
$T_m(t)$	- Torque eletromagnético instantâneo do motor para a junta k .
T_{mx}	- Torque eletromagnético do motor, obtido pelo do produto de torque máximo.
T_{mp}	- Valor de pico do torque eletromagnético do motor no catálogo do motor.
T_o	- Torque do motor em vazio.
T_o^i	- Matriz de transformação homogênea de elementos do sistema de coordenadas de um elo (i) para o sistema de coordenadas referencial θ , definida por Denavit Hartenberg.
T_p	- Matriz genérica dos torques de perturbações ou externos (no capítulo 2).
T_p	- Torque de pico do motor.
T_{pk}	- Torque de perturbação instantâneo de uma junta robótica k .
\tilde{T}_{pk}	- Valor eficaz do torque de perturbação instantâneo de uma junta robótica k .
$T_{pk}(i)$	- Torque de perturbação de uma junta robótica k , numa i -ésima amostragem.
T_{pkp}	- Valor de pico torque de perturbação de uma junta robótica k .
T_{pkx}	- Torque de perturbação de uma junta robótica k .
T_{trans}	- Torque instantâneo de uma transmissão, ou torque interno do acoplamento.
T_{util}	- Torque instantâneo da carga da garra visto pela junta k .
T_{vis}	- Torque instantâneo de atrito viscoso da junta k .
$T_{vis}(i)$	- Torque de atrito viscoso da junta k , numa i -ésima amostragem qualquer.
$T_{vis}(ix)$	- Torque de atrito viscoso da junta k , amostrado no instante do torque motor máximo.
\tilde{T}_{vis}^2	- Valor eficaz do Torque de atrito viscoso da junta k .
T_{vix}	- Torque de atrito viscoso da junta k , no instante do produto de torque de pico.
T_x	- Torque do motor para carga máxima.
V	- Tensão nos terminais do motor.
V	- Energia potencial gravitacional.
v	- Vetor das velocidades translacionais da junta i .
V_p	- Tensão de pico nos terminais do motor.
X	- Fator de conversão de movimento linear em movimento rotacional e vice e versa.
X	- Matriz genérica das variáveis de um sistema (no capítulo 2).

X^T	- Transposto da matriz genérica das variáveis de um sistema.
W_m	- Energia consumida pelo sistema.
W	- Representação genérica para a velocidade do motor.
W_c	- Representação genérica para a velocidade da carga.
W_{cm}	- Representação genérica para a velocidade da carga referida ao lado do motor
W_o	- Representação genérica para a velocidade do motor em vazio.
W_p	- Representação genérica para a velocidade do motor com torque de pico do motor, $W_o - \Delta W_p$.
W_x	- Representação genérica para a velocidade do motor com a carga máxima da junta.
W_{cx}	- Representação genérica para a velocidade da carga com o torque máximo da junta.
z_i	. Vetor que representa as orientações do elo i referido à base.

Lista de Siglas e Abreviaturas Utilizadas

ca - Corrente alternada..

cc - Corrente contínua.

DFN - Diagrama de Forças Normais.

DMF - Diagrama de Momentos Fletores.

DMV - Diagrama de Momento Torsor.

DPM - Departamento de projetos mecânicos.

DSCE - Departamento de Sistema de Controle e Energia.

JECA II - Robô em fase de construção no LSMR do DSCE da FEEC da UNICAMP.

LSI - Laboratório de Sistemas Integrados

LSMR - Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos.

MKS - Sistema de unidades de medidas inglês, que significa (*Mass Kilogram and Secund*).

POO - Programação Orientada a Objeto.

PS - Programação Sequencial.

PETROBRÁS - Petróleo do Brasil Sociedade Anônima.

PUMA 560 - Um dos primeiros robôs do tipo rígido com cadeia serial, produzido em série, e muito utilizado em estudos e publicações.

SI - Sistema Internacional de Medidas.

SCHM - Sistema de Comunicação Homem Máquina.

SCARA - Um dos primeiro robôs do tipo *RRP* que utiliza acionamento com barras paralelas.

Lista de *Softwares* Desenvolvidos e Utilizados

A) PROGRAMAS DESENVOLVIDOS:

AAMMOVISA - Algoritmo de Análise de Manipuladores Modulares Visando Seleção de Atuadores:

É um programa cuja função é simular diferentes manipuladores operando em diferentes tarefas e condições de operações e que sugere e especifica combinações possíveis de acionamento. Ele efetua a aquisição de parâmetros relacionados com estes fatores, e gera bancos de dados a partir da estruturação cinemática e geométrica de diferentes tipos manipuladores planares cartesiano ou rotacional, de até três graus de liberdade, (informações detalhadas são fornecidas no anexo A).

AFICESE - Algoritmo de Fusão, Integração e Compatibilização Estrutural dos Elos:

Trata-se de um programa que realiza a função de fundir os atuadores e seu acessórios selecionados nas juntas superiores da cadeia cinemática gerando um banco de parâmetros geométricos compatível com a programação da modelagem dinâmica, sendo essencial na remodelagem exigida durante o processo de seleção de atuadores (vide maiores explicações no capítulo 2).

AHOVATA - Algoritmo para Homogeneização da Variação do Tempo de Amostragem:

É um programa que padroniza os intervalos de amostragem da leitura de perfis onde a variação entre as amostragens não é constante (anexo A).

ALSIMOPLA - Algoritmo com Equações Dinâmicas Invariantes de um Manipulador Planar:

Trata-se de um algoritmo que contém as equações dinâmicas de um manipulador planar servindo para confirmação e agilização de testes na seleção de atuadores para manipuladores. Ele foi desenvolvido no ambiente dos aplicativos SIMULINK/MATLAB™ (diagramas de blocos em [SILVA, 98e]).

AMODIRO - Algoritmo de Modelagem Dinâmica de Robôs:

Sua função é determinar o modelo dinâmico algébrico para a carga e a configuração robótica escolhida. (veja maiores explicações e análise matemática no capítulo 2).

APECAM - Algoritmo de Pesquisa de Catalogação e Arquivo de Motores:

É um programa que realiza operações de controle de entrada e saída de parâmetros do arquivo do catalogo de motores elétricos comerciais. Ele permite criar e apagar arquivos, inserir, retirar, modificar, reposicionar e carregar parâmetros de um dado motor no arquivo de dados e além disto, ele permite apresentar os parâmetros de cada motor no video (anexo A).

APECAR - Algoritmo de Pesquisa de Catalogação e Arquivo de Redutores:

É um programa que exerce as mesmas funções do algoritmo APECAM mencionado acima, em relação aos parâmetros dos redutores, que são diferentes e em menor número que os parâmetros dos motores (anexo A).

ARQUIRED.M - Banco de dados ou catálogo de redutores:

É gerado pelo programa APECAR e usado pelos programas do SIGECOSAM.

ARQUIMOT.M - Banco de dados ou catálogo de motores:

É gerado pelo programa APECAR e usado pelo programa APECAM.

ASELATUM - Algoritmo de Seleção de Atuadores para Manipuladores:

É usado para analisar e selecionar o atuador, motor e redutor das juntas do manipulador. Programa que efetua a seleção de atuadores observando os diversos critérios estabelecidos para cada junta do mesmo (detalhes no capítulo 3 e anexo A)

ASICITRIM - Algoritmo de Simulação do Modelo Cinemático Tridimensional Manipuladores:

É um *software* que visa unicamente a simulação tridimensional da realização de tarefas, os modelos cinemáticos e o comportamento da garra de manipuladores no espaço (outras informações no anexo A).

ATAPAMOM - Algoritmos de Teste, e Arbitragem de Parâmetros para Modelagem de Manipuladores:

É um conjunto de cinco programas de modelagem de manipuladores e suas condições de operações, que interagem entre si, tendo sido muito importante no desenvolvimento e estudo da modelagem dinâmica e do processo de seleção de atuadores, podendo ser considerado uma versão mais velha do SIGECOSAM, que utiliza dados *defaults*, algébricos e originais de manipuladores e atuadores, e que responde com a determinação dos modelos algébricos (veja maiores detalhes no anexo A, em [BADAN PALHARES, 94] e [SILVA, 98J]).

RAVEDI - Rotina de Apresentação Visual das Equações Dinâmicas: é o programa encarregado de realizar a apresentação das respostas dinâmicas de cada junta, para a execução das tarefas um manipulador através do tempo, (exemplos no capítulo 4 e (anexo A)).**RAVIPECI - Rotina de Apresentação Visual da Equações Cinemáticas:** é um programa com a função de realizar a apresentação das respostas cinemáticas de cada junta, para a execução das tarefas de um manipulador, (Ver exemplos no capítulo 4. e outras informações no (anexo A)).**SIMATRIJU - Algoritmo de Simulação de Modelo Atrito de Junta Robótica:** é um programa que simula o modelo de atrito de um manipulador, apresentado em [SILVA, 98o] através do SIMULINK/MATLABTM, (anexo A).**SIGECOSAM - Sistema Geral de Coordenação de Seleção de Atuadores de Manipuladores:**

Trata-se do programa principal que coordena os diversos outros programas deste trabalho, principalmente os de seleção de atuadores, ASELATUM, AMODIRO, AHOVATA, ATAPAMOM, RAVEDI, RAVIPECI, AFICESE, e outros de menor importância e que não foram relatados neste trabalho. Veja detalhes no capítulo 3.

SIMOTERJU - Algoritmo de Simulação de Modelo Térmico de uma Junta Robótica: É um programa que simula o modelo termodinâmico de um manipulador, baseado e [SILVA, 98b], através do SIMULINK/MATLABTM, e é brevemente comentado também no anexo A.**SIMULINK -** É uma ferramenta para modelagem, análise e simulação contendo grande variedade de sistemas físicos e matemáticos. É uma extensão do MATLAB contendo muitas características de sistemas dinâmicos.

B) ARQUIVOS DE COMUNICAÇÃO DE DADOS:

CATAL.C - Banco de dados ou **catálogo de motores**, usado pelo programa APECAM.

CATAR.C - Banco de dados ou **catálogo de redutores**, usado pelos programas do SIGECOSAM.

CHRIST.MA - Banco de dados que contém a matriz com os **Símbolos de Christoffel**:

É utilizados para determinar as forças de (Coriolis e centrífuga) do modelo dinâmicos.

CONTA.C - Banco de dados que contém o **número de motores do catálogo**:

É utilizado pelo programa APECAM.

CONTAR.C - Banco de dados que contém o **número de motores do catálogo**, usado pelo programa APECAR

DAD2o - Banco de dados que contém os parâmetros de eventuais atuadores substitutivos.

DAD1o - Banco de dados que contém os parâmetros representando as condições originais para as juntas, banco de dados.

DAD4o - Banco de dados que contém os dados de eventuais dos parâmetros físicos resultantes.

DAD5o - Banco de dados que contém virtuais coeficientes de posição relativas dos atuadores.

DADO6.M - Banco de dados gerado pelo programa **AAMMOVISA**:

É utilizado pelo SIGECOSAM, e que contém os parâmetros da carga, Denavit hartenberg, das configurações do sistema de acionamento, situações dos atuadores pretendidas, o tempo de aquisição, e o número de pontos amostrados na simulação.

DADOC.M - Banco de dados gerado pelo programa **AAMMOVISA**, contendo os perfis cinemáticos ou tarefas e é utilizado pelo SIGECOSAM.

ESFORC.MA - Banco de dados contendo a matriz com o perfil dinâmico das juntas para as condições cinemáticas estabelecidas produzidas pelo programa **AMODIRO**.

FORCA.M - Banco de dados com as equações dinâmicas.

INERCIA.MA - Banco de dados que contém os termos inerciais dos robô,

C) APLICATIVOS UTILIZADOS:

AUTOCAD - programa para o sistema WINDOWSTM, utilizado para desenho técnico, utilizado para a construção de várias figuras.

C++ - Linguagem de programação em C que suporta a programação orientada a objeto - POO.

COREL DRAW - Aplicativo para editoração de figuras e gráficos que foi utilizado para a definição e construção modificação e reparos de muitas figuras desta tese.

EMAX - editor de texto utilizado para editoração dos capítulos em ASC II, em ambiente WINDOWSTM.

GHOSTVIEW - Aplicativo utilizado para e imprimir e mostrar na tela, textos poscript compilados através da programação LATEX

LATEX - Programação usada em sistema DOS ou UNIX para compilador de textos, através da qual foram definidos os capítulos 2 e 3 e o anexo A.

MATHEMATICA - Aplicativo de programação cujo ambiente possui bibliotecas que realizam as mais diversas operações e funções matemáticas e as combina para simular sistemas algébrica, numérica e graficamente, e suporta programação orientada a objetos - POO.

MATLAB - Aplicativo utilizado para analisar e simular os modelos e sistemas físicos e matemáticos.

OPENWIN - Interface gráfica semelhante ao WINDOWSTM, utilizado com o sistema operacional UNIX

TURBO C - É um compilador de programas em linguagem C, produzido pela BORLANDTM.

UNIX - Sistema operacional análogo ao DOS.

XFIG - Aplicativo operante junto ao WINDOWSTM, para editoração de figuras e gráficos, que foi utilizado para a definição e construção de muitas figuras desta tese.

XTEDIT - editor de texto utilizado para editoração dos capítulos em ASC II, em ambiente OPEWIN.

XWIN - Interface gráfica semelhante ao WINDOWSTM, utilizado com o sistema operacional UNIX

WINDOWS - Sistema com interface gráfica utilizado, que é produzido pela MICROSOFT^{NT}.

WORD - Editor de texto da MICROSOFTTM, empregado para editar toda tese exceto os capítulos 2 e 3 e o anexo A.

Sumário

AGRADECIMENTOS	I
EPÍGRAFE	III
GLOSSÁRIO	V
SIMBOLOGIA	IX
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS UTILIZADAS	XXI
LISTA DE <i>SOFTWARES</i> DESENVOLVIDOS E UTILIZADOS	XXIII
SUMÁRIO	XXVII
RESUMO	XXXI
ABSTRACT	XXXIII
CAPÍTULO 1: - POSICIONAMENTO DO PROBLEMA	1
1.1 - Introdução	1
1.2 - Proposta de Trabalho	4
1.3 - Metodologia Proposta	7
1.4 - Conteúdo Geral da Tese	10

CAPÍTULO 2: - MODELAGEM DE MANIPULADORES ROBÓTICOS	11
2.1 - Componentes dos Manipuladores	11
2.2 - Classificação dos Manipuladores	13
2.3 - Identificação das Configurações de Manipuladores	13
2.4 - Geração de Trajetória de Manipuladores	14
2.5 - Modelagem Cinemática de Manipuladores	18
2.6 - Modelagem Dinâmica de Manipuladores	22
2.7 - AMODIRO - Programa de Modelagem Dinâmica de Manipuladores	24
2.8 - Influência da ação do campo gravitacional sobre o modelo dinâmico dos manipuladores	27
2.9 - AFICESE - Programa de fusão e compatibilização dos parâmetros estruturais dos manipuladores	37
2.10 - Considerações finais	49
CAPÍTULO 3: - ANÁLISE DO PROBLEMA DA SELEÇÃO DE ATUADORES ...	51
3.1 - Introdução: (critérios e topologias de seleção de atuadores)	51
3.2 - Classificação, Tendências e Tipos de Atuadores Primários	54
3.3 - Modelagem de uma Junta Robótica Isolada	63
3.4 - Seleção de Motores de Corrente Contínua para Juntas com Acionamento Reduzido	59
3.5 - Seleção de Motores de Corrente Contínua para Juntas com Acionamento não Reduzido	101
3.6 - Determinação dos Parâmetros Terminais do Motor	111
3.7 - Programas Computacionais para Seleção de Atuadores para Manipuladores	113
3.8 - Considerações Finais	124
CAPÍTULO 4: - RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	127
4.1 - Condições, tarefas, ambientes, e tipos de manipuladores usados	128
4.2 - validação dos Algoritmos de Modelagem Dinâmica Usadas	137

4.3 - Resposta aos Principais Fatores que Influenciam na Resposta Dinâmica	147
4.4 - Análise da Influência dos Parâmetros de Carga, Acoplamento, Motores e Ambiente nos Parâmetros de Seleção de Atuadores	187
4.5 - Análise das Respostas a Otimização do Consumo de Energia	216
4.6 - Parâmetros Básicos e Intermediários, com Comparação para as Topologias de Seleção de Atuadores para Acionamento Indireto em Manipuladores	225
4.7 - Parâmetros do Atuador (motor DC) no Final do Processo	236
4.8 - Considerações Finais	242
CAPÍTULO 5: - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	247
5.1 - Programas Computacionais Desenvolvidos	248
5.1 - Conclusões sobre as Técnicas de Seleção de Atuadores Introduzida nesta Tese	249
5.1 - Perspectivas Futuras	251
BIBLIOGRAFIA:	353
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	359
ANEXO A: - DETALHES DA PROGRAMAÇÃO AUXILIAR DE APOIO E DE TESTE	263
A.1 - Adições aos Programas Principais	263
A.2 - AAMMOVISA - Algoritmo de Análise de Manipuladores Modulares Visando Seleção de Atuadores	264
A.3 - Outros Arquivos de Apoio	491
A.4 - ATAPAMOM - Algoritmos de Teste e Arbitragem de Parâmetros para Modelagem de Manipuladores	295
A.5 - Considerações Finais	298
ANEXO B: - LISTAGENS, LISTAS E TABELAS DE PARÂMETROS DO PROCESSO DE SELEÇÃO DE ATUADORES	299
B.1 - Listagens Arquivos de Dados Geradas pelo Programa AAMMOVISA	299

B.2 - Listas de Parâmetros do Processo de Seleção de Atuadores	305
B.3 - Tabelas de Informações sobre os Motores	308

Resumo

SILVA, N. C., ROSÁRIO, J. M., BADAN PALHARES, A. G., Seleção de Atuadores e Acionamento Integrada a Modelagem de Manipuladores Robóticos Industriais Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, 1998, 310 p., (Tese de Doutorado: em Engenharia Elétrica)

Esta tese apresenta um estudo do processo de seleção de atuadores para juntas de manipuladores rígidos com n graus de liberdade, integrado à automatização da modelagem dinâmica utilizando as equações de Euler Lagrange. Os programas computacionais desenvolvidos foram implementados no ambiente do MATHEMATICA™, que contém bibliotecas de funções básicas que agilizaram o desenvolvimento da programação.

O enfoque principal deste trabalho concentra-se na seleção de atuadores considerando critérios dinâmicos, térmicos e cinemáticos. Este processo culmina com a especificação analítica ideal do motor e redutor para cada junta, conforme o tipo de acionamento (Direto, indireto reduzido e indireto não reduzido) e a carga atuante sobre a junta durante a realização de uma tarefa previamente especificada para o manipulador desejado.

A proposta do tema desta tese destaca-se porque modifica os parâmetros físicos e geométricos da equação dinâmica utilizando dois procedimentos internos: a fusão dos parâmetros dos atuadores e dos elos, considerando-os como um objeto único, e a compatibilização do formato dos parâmetros físicos com o formato exigido pelo ambiente de programação. Estes parâmetros dependem das operações típicas da seleção e redistribuição dos atuadores e das modificações dos tipos de acionamento das juntas que são aspectos inerentes das fases de projeto e redimensionamento de manipuladores.

Finalmente, são apresentados os principais resultados das simulações mostrando o comportamento dinâmico a partir de perfis cinemáticos previamente estabelecidos para um manipulador planar cuja garra se desloca através de um segmento de reta, revelando as alterações da intensidade dos esforços para os diferentes posicionamentos dos atuadores, conforme os tipos de acionamento específicos.

Palavras Chave:

Manipulador Robótico, Seleção de Atuadores, Modelo Dinâmico, Simulação Computacional

Abstract

SILVA, N. C., ROSÁRIO, J. M., BADAN PALHARES, A. G., Seleção de Atuadores e Acionamento Integrada a Modelagem de Manipuladores Robóticos Industriais Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, 1998, 310 p., (Tese de Doutorado: em Engenharia Elétrica)

This thesis is a study of the actuators selection process for joints of rigid manipulators with generic degrees of freedom, integrated into the automation of dynamic modeling using Euler-Lagrange equations. The program that executes these processes is based on the MATHEMATICA™, which contains libraries that provide the development of the programation.

The main focus of this work is on actuators selection, while considering the dynamics, thermics and kinematics criterion. This process culminates with the ideal analytic specification of the motor and reducer for each joint, according to the drive type: (direct, indirect reduced and indirect unreduced), and the load that acts on the joint during the execution of a task previously specified for desired manipulator.

The proposal of this work theme detach because it modifies the physical and geometric parameters of the dynamic equation, using two internal processes: the fusion of the actuators and links parameters considering them as a single object, and the compatibilization of physical parameters format with the one demanded by the programming environment. These parameters depend on typical operations such as selection and redistribution of the actuators and also on the modifications of joint drives, that are inherent aspects of the project phases and of the manipulators redimensioning.

Finally, the main results of the simulations are presented showing the dynamic behavior to the cinematic profiles previously established for a planne manipulator, whose end-effector moves through a straight line segment, showing the alterations of the effort intensity for different actuators positioning, according to specific drives.

Key words:

Robotic Manipulators, Actuators Selection, Dynamic Model and Computational Simulation.

Capítulo 1

Posicionamento do Problema

O LSMR - Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos, do DSCE - Departamento de Sistema de Controle e Energia, da FEEC - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas vem concentrando seus esforços na área de automação e robótica. Neste projeto está sendo desenvolvido um SCHM - Sistema de Comunicação Homem Máquina para aplicação num robô industrial, [MADRID, 94].

A utilização de um SCHM - Sistema de Comunicação Homem Máquina, visa dominar o conhecimento tecnológico deste equipamento, reduzir custos de construção e otimizar projetos de manipuladores robóticos, pois os robôs são elementos importantes para muitos projetos da automatização, principalmente em operações que envolvem processos repetitivos e rápidos, de difícil acesso ao homem, ou alta periculosidade.

Dentro deste pacote de software foi proposta a criação de vários módulos, sendo um destes para o sistema de acionamento (composto de atuadores, motores redutores, conversores e acionadores mecânicos). Assim este trabalho concentrou-se na produção de um pacote computacional, que permitirá a definição ou alteração deste módulo durante o projeto de um manipulador, baseada na análise e projeto de manipuladores, envolvendo a modelagem dinâmica e cinemática, generalizada e segmentada do manipulador, a carga transportada, o posicionamento dos atuadores na estrutura do manipulador, e seu sistema de acionamento. Isto permitirá a determinação, por exemplo, do melhor tipo de acionamento e o melhor atuador necessário para acionar cada junta de um manipulador, de modo que o mesmo possa realizar uma determinada tarefa em função de uma carga variável.

O desenvolvimento desse trabalho será concentrado em duas linhas de pesquisa: a modelagem dos sistemas robóticos e o processo de seleção de atuadores.

1.1 Introdução

A análise de projetos de manipuladores rígidos modulares visando o processo de escolha de atuadores para robôs é um trabalho complexo. Há diversos fatores que motivam a realização de um trabalho deste tipo. Estas motivações podem ter duas perspectivas, a do pesquisador que cria, e a da sociedade que se beneficia.

No Brasil, a PETROBRÁS realiza pesquisas e operações submarinas em águas profundas, o que representa um grande risco para vida de mergulhadores. Além disso, outras operações realizadas em ambientes adversos, tais como usinas atômicas, manipulação de produtos tóxicos, e condições de trabalhos de elevado índice de riscos, de insalubridade e periculosidade poderiam ser realizados pelos manipuladores sem necessidade de intervenção humana direta.

Muitas vezes o emprego do manipulador é dificultado pela falta de popularidade, desconhecimento de sua existência e capacidade, e o elevado custo inicialmente envolvido. Na perspectiva do engenheiro pesquisador, a motivação maior é a satisfação de desafiar o problema, aumentar a eficiência e reduzir custos, dando um passo para compreender e otimizar a tecnologia relacionada a um equipamento que pode poupar pessoas que trabalham com risco de suas próprias vidas. Outra grande motivação é a esperança de dominar uma tecnologia que pode ser muito útil nas telecirurgias modernas, podendo salvar vidas a distância em circunstâncias difíceis e inacessíveis circunstancialmente.



Figura 1.1: Diagrama de motivações para a seleção de atuadores robóticos.

Para a perspectiva da sociedade, que se motiva também pelas razões supracitadas, a construção de um programa que faz análise de projeto de manipuladores e seleção de atuadores, pode ser motivada primeiro pelo aumento na confiança no equipamento na fase de aquisição, pois permite ao comprador a possibilidade de saber: o que ele pode realizar com o manipulador, o que este dispositivo pode fazer para a solução do seu problema; e quais modificações ele poderia fazer no manipulador para que ele resolvesse seu problema; e quanto estas alterações custariam ao equipamento.

Isto nos leva as seguintes soluções: promover projetos técnicos de capacitação de robôs, conseguida pela análise das estruturas, cargas e escolha dos atuadores corretos. A terceira motivação está relacionada com o fornecimento de uma metodologia de estudo dinâmico de manipuladores. Em quarto lugar, prover ao operador facilidades e meios de prever e realizar a programação de tarefas. Em quinto lugar, agilizar a determinação de atuadores ótimos para manipuladores

modulares, e a última motivação está no aumento da segurança na escolha técnica do manipulador para cada tarefa. De uma forma geral, são inúmeras as motivações que nos levaram a realização deste trabalho, e as principais delas se encontram esquematizadas na figura 1.1.

1.1.1 Modelagem do Sistema

A modelagem do sistema robótico, permite a determinação dos esforços das juntas. Isto é essencial para que a escolha de bons atuadores leve em consideração a economia de materiais, energia, espaço, e aumento da produção, eficiência além do menor impacto ecológico.

Dentre os diversos artigos relacionados com a modelagem cinemática e dinâmica dos manipuladores robóticos rígidos, pode-se citar [ARMSTRONG, 86], [IZAGUIRRE, 86], [ALVES, 88], [ARAUJO, 89], [LEU, 96], e [NEWMAN, 87], [CRAIG, 89], [SPONG, 89], [MACHADO, 92], [GALHANO 90] que apresentam técnicas de resolução do modelo dinâmico de manipuladores.

Em [LEU 96], [ARMSTRONG, 86], [IZAGUIRRE, 86] e [NEUMAN, 87], resolve-se o modelo dinâmico derivando as matrizes de transformação homogênea como técnicas intermediárias. Em [NEWMAN, 87] é apresentada a equação dinâmica completa do PUMA 560.

Em [LEE, 90] e [RAMIREZ, 91], sugere a resolução do modelo utilizando técnicas de redes neurais. [CRAIG, 89] e [SPONG, 89] apresentam detalhadamente o processo de modelagem utilizando diversas técnicas. [SPONG, 89] trabalha com o conceito do Jacobiano como técnica de obtenção do modelo dinâmico.

Em [ROSÁRIO, 90], o modelo dinâmico de um robô 6R é detalhado utilizando-se diagramas de blocos, recurso que permite a compreensão do significado do acoplamento dinâmico do modelo, e [LATRE, 88 e 92] apresentam uma forma simplificada para a modelagem de robôs visando sua utilização para controle de esforços de manipuladores. [MACHADO, 92] e [GALHANO, 90] sugerem também uma técnica estatística para a determinação do modelo dinâmico de um robô.

A modelagem dinâmica de robôs envolve um equacionamento complexo, uma quantidade enorme de parâmetros básicos e intermediários, geralmente não lineares, diversas transformações relacionadas à análise de projeto, a compatibilização de parâmetros dentro dos programas envolvidos e a passagem de dados entre um e outro. Ao mesmo tempo a identificação de parâmetros é um aspecto a ser considerado. [YUAN, 94] dedica grande parte de seu trabalho a este assunto, e em [STIOPIN, 68], está contida uma grande diversidade de teoremas que auxiliam na identificação e compatibilização de parâmetros para o processo de modelagem relacionado à adaptação de atuadores na estrutura dos elos.

1.1.2 Especificação de atuadores

A especificação de atuadores consiste em determinar o atuador ideal para acionar cada junta, e em função disto determina-se a capacidade da mesma. O atuador pode representar uma carga extra para outras juntas, o que é intensificado quando ele está associado a acessórios como os redutores, transmissão e conversores mecânicos, e isto influi também na estrutura do manipulador. O superdimensionamento dos atuadores pode elevar o custo do projeto geral e seu subdimensionamento implicaria automaticamente na incapacidade da junta acionada e conseqüentemente na incapacidade do manipulador executar as funções para as quais foi programado, justificando a importância dada ao estudo do processo de seleção que pode envolver dezenas de critérios.

Diversos artigos estão relacionados com a seleção de atuadores. O artigo [POTKONJACK, 89b], realiza a análise dinâmica e térmica de motores de corrente contínua para manipuladores, embora empregue parâmetros não convencionalmente utilizados, tais como a variação instantânea da aceleração da junta. Pode-se citar ainda, outras referências do mesmo autor sobre este assunto, [POTKONJACK, 89a]; [POTKONJACK, 89c]; e [POTKONJACK, 88], todos que por sua vez tiveram origem em [VUKOBRATOVIC, 86] que trabalha com seleção de motores de corrente contínua e [VUKOBRATOVIC, 84] para motores eletrohidráulicos. [SHNEYDOR, 89], mostra um maior avanço no conhecimento do problema da seleção de atuadores, embora ele apresente preocupação com atuadores de cargas constantes, e não especificamente com a seleção para atuadores de juntas de manipuladores, cujos esforços gravitacionais e inerciais variam conforme a geometria do robô. Este último artigo serve como referência principal deste trabalho.

[SEERING, 84], aborda a escolha de atuadores para manipuladores de uma forma simples e objetiva. [TRZYNADLOWSKI, 88] e [DC MOTOR, 73] preocupam-se com a otimização do consumo de energia de certas classes de atuadores em função de suas aplicações.

1.2 Proposta de Trabalho

Para ilustrar os principais objetivos a serem atingidos neste trabalho, apresentam-se a seguir, três considerações:

CONSIDERAÇÃO I:

Suponha que um determinado senhor X, (fabricante de automóveis, explorador de petróleo submarino, proprietário de uma usina nuclear ou telecirurgião) tenha em seus processos uma fase que contém uma tarefa, a ser realizada por uma determinada ferramenta, e que a mesma exija a realização de um determinado esforço, tal como, carregar uma carga além da ferramenta, de um ponto a outro do espaço seguindo uma trajetória com velocidade e aceleração específica. Então o senhor X, encaminha esta questão a seu consultor técnico para que seja decidida a forma mais econômica e técnica de se realizar esta tarefa, e que se chegue a um impasse, entre usar um manipulador ou outro tipo de solução. Como se poderia fazer uma análise para tirar conclusões que relacionem o robô com a resolução da tarefa? Existem seis opções para se fazer este tipo de análise:

1. **Seleção de um manipulador pré fabricado e disponível no mercado.** Isto implica em verificar se a carga ou tarefa encontra-se dentro de capacidade de realização do robô, observando esforços, alcance, velocidade e acelerações da garra, o volume de trabalho e pontos de singularidades, custo, consumo, confiabilidade e repetitividade, que podem estar especificados através de catálogos. Esta primeira opção, é um pouco grosseira, podendo ser tomada a partir dos manuais ou catálogos de um ou mais manipuladores. Nesta situação teria que optar-se por aquele que mais se aproximasse da necessidade do cliente. Dificilmente o manipulador pode atender as necessidades em todos os quesitos, mas ele poderia estar superdimensionado em alguns quesitos, de modo a permitir a sua capacitação em todos os outros. Entretanto, o mesmo seria o melhor entre os demais, mas provavelmente não o mais “ótimo” para a tarefa, que poderia implicar numa perda de energia durante a operação.
2. **Projetar um manipulador específico para a tarefa,** é também uma escolha, porém bem mais radical, porque dificilmente se pode projetar e executar imediatamente um projeto, além disso custo de um projeto exclusivo, é muito mais elevado.

3. **Fazer ensaios de laboratórios para testar os manipuladores para a tarefa.** Neste caso mesmo com a existência de catálogo, dependendo da tarefa, se poderia ter dúvida sobre algum ponto de operação ou capacidade, então ensaios de laboratório poderiam facilitar uma decisão técnica entre usar ou não, ou entre um e outro manipulador, pela sua eficiência.
4. **Usar algoritmos de simulação específica e integrada do manipulador.** Esta é uma opção que pode substituir os ensaios, podendo ser mais rápida, e econômica, não apresentando risco de segurança para o equipamento.
5. **Redimensionar o manipulador, especificando os elementos de cada módulo pelos catálogos.** Esta opção se aplicaria aos manipuladores modulares, e implica em especificar os elementos mais ótimos de cada módulo para satisfazer cada quesito usando-se basicamente as informações pelos catálogos dos componentes ou elementos opcionais dos módulos.
6. **Redimensionar manipulador, usando algoritmos para simular, a tarefa e as condições de trabalho, por módulos.** Esta opção implica em reprojetar manipuladores baseado em módulos bem definidos, inclusive para a carga ou tarefa, acionamento, juntas, algoritmos de controle, estrutura dos elos, compensação de desequilíbrio de massas, de tal forma que este manipulador possa ser montado rapidamente conforme o algoritmo indique sugira ou defina os melhores componentes disponíveis de cada módulo conforme necessidade da tarefa. Neste caso a inexistência de um módulo, requereria somente o projeto e confecção de um outro módulo, mas não de um manipulador inteiro.

CONSIDERAÇÃO II:

Seja qualquer manipulador rígido típico, com cadeia serial como aquele apresentado na figura 1.2, porem generalizado contendo n juntas, que podem ser prismáticas ou rotacionais, e cujo acionamento de cada junta pode ser direto ou indireto conforme figura. Então pode-se especificar pontos na estrutura dos elos, onde se pode fixar as partes dos atuadores de cada uma de suas juntas, como mostrado na figura citada.

CONSIDERAÇÃO III:

Suponha que para a figura 1.2, o projeto do manipulador comentado na CONSIDERAÇÃO II, seja definido um módulo relacionado com o acionamento, a partir de suas dimensões, capacidade, situação dos atuadores e seus componentes. Para a definição destes atuadores, pode-se criar um banco de dados que armazena uma lista de atuadores fornecidos por catálogos comerciais, a qual pode ser pesquisada, acessada e/ou modificada.

PROPOSTA FINAL DE TRABALHO:

A proposta deste trabalho consiste na elaboração de uma série de algoritmos que se relacionam entre si conforme o diagrama ilustrado na figura 1.3, podendo simular alguns projetos de manipuladores rígidos básicos de diversos conforme os tipos apresentados na CONSIDERAÇÃO II, executar o procedimento do item 6 da CONSIDERAÇÃO I, e permitir ao usuário tomar decisões sobre os tipos de manipuladores e seus módulos como citado na CONSIDERAÇÃO III, que realizem uma determinada tarefa nas condições da CONSIDERAÇÃO I, e que sejam ainda capazes de criar um arquivo de pesquisa e catalogar os parâmetros técnicos, comerciais e de referência de atuadores conforme apresentado na CONSIDERAÇÃO III.

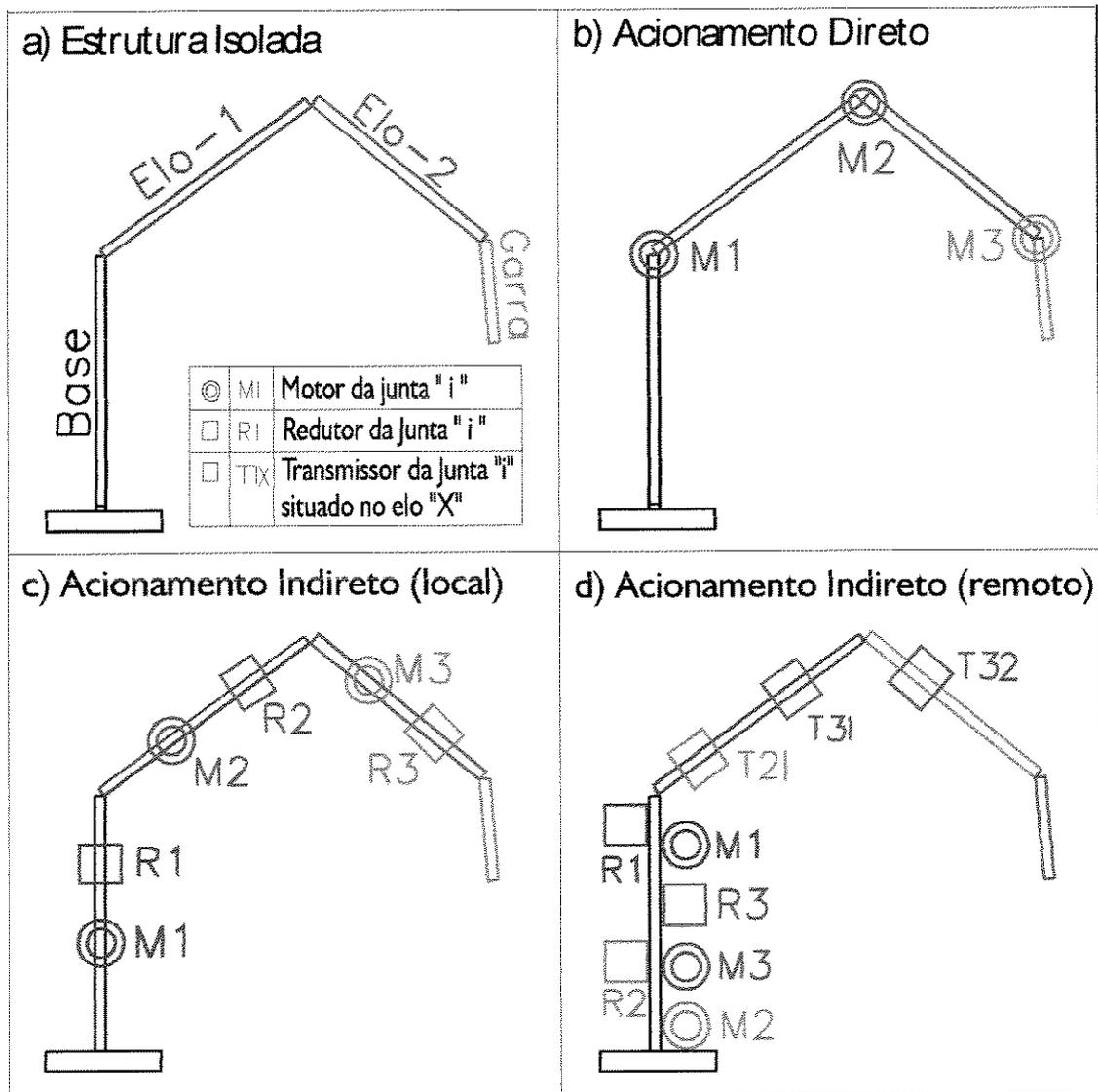


Figura 1.2: Esquema de configurações de atuadores.

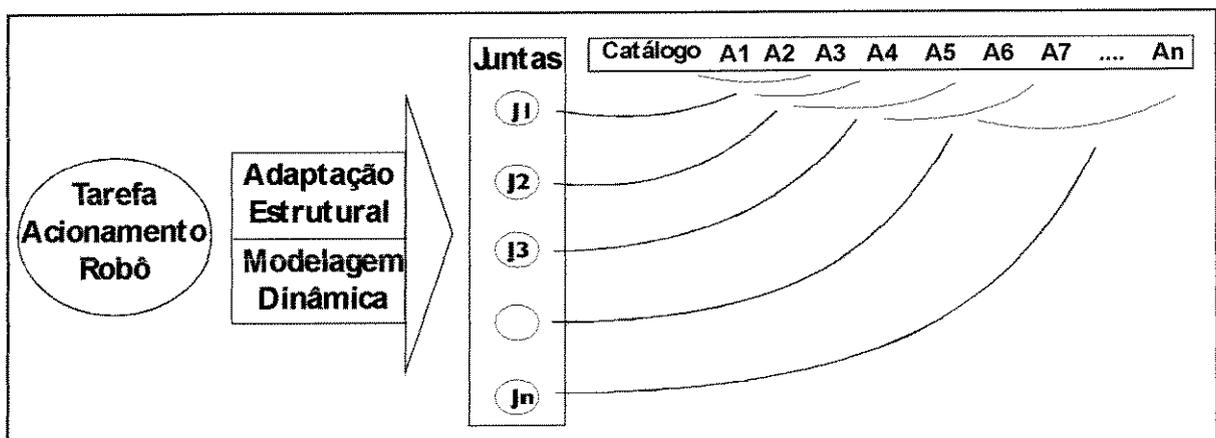


Figura 1.3: Diagrama geral do processo de seleção de motores.

1.3 Metodologia Proposta

Com o objetivo de realizar o projeto de seleção de atuadores, foi desenvolvido um pacote computacional composto de procedimentos importantes separados em nove blocos, conforme ilustrado na figura 1.4, através dos quais foi validada a proposta de trabalho apresentada anteriormente.

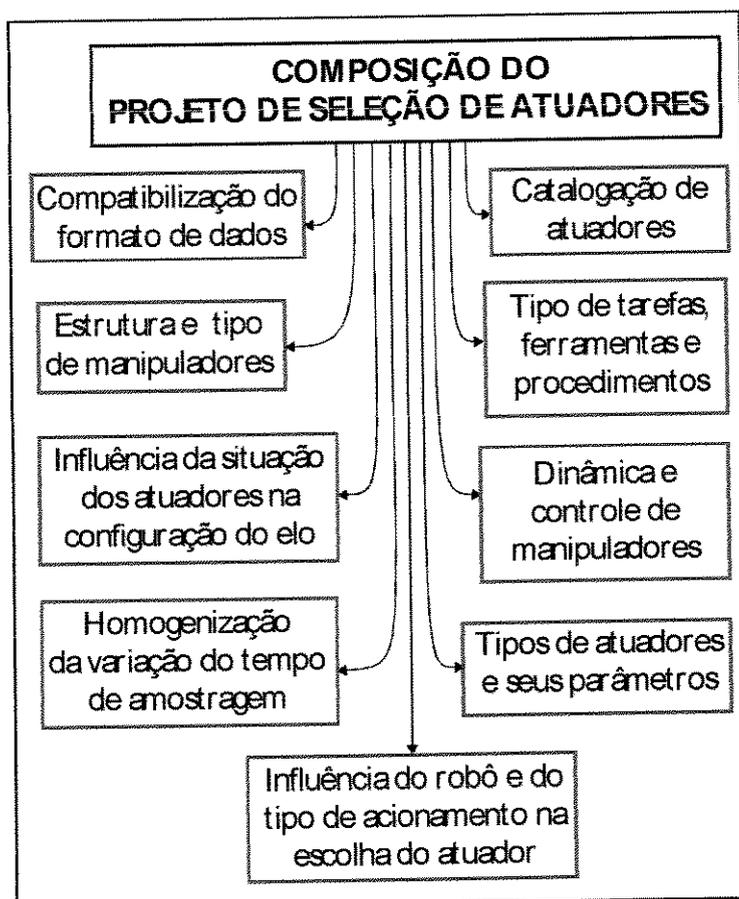


Figura 1.4: Composição do processo de seleção de atuadores para robôs.

Os nove blocos da figura 1.4, e que compõe o projeto de seleção de atuadores são executados por alguns programas, ou associações de algoritmos e sub-programas que são os seguintes:

1. Programa básico de apoio que providencia a definição das tarefas a serem executadas pelo manipulador, ferramentas utilizadas, dimensionamento e conformação da carga e dos procedimentos para concretização do comportamento da tarefa, tais como a escolha de sub algoritmos para definição da trajetória, velocidade, aceleração e orientação da garra.
2. Programa que permite analisar o tipo da estrutura dos elos e do manipulador em geral, e definição dos parâmetros geométricos (dimensões e formas) e tipos de juntas para escolha dos módulos, conforme necessidade do cliente, projetista, ou analista.
3. Programa que considera a influência da situação dos atuadores na configuração dos elos, e que providencia a adaptação, (fusão ou incorporação) dos atuadores aos elos, pela inclusão dos parâmetros dos atuadores no cálculo dos parâmetros dos elos, sempre após a escolha do atuador de cada junta.

4. Programa para definição ou leitura orientada da configuração do acionamento do manipulador, ou seja, definição do tipo de acionamento provável ou disponível para cada junta do manipulador. E também para a escolha da situação e orientação, de cada peça dos atuadores de cada junta, (motor, rotor, estator, transmissor, e/ou redutor), conforme possibilidade e modularidade do projeto do manipulador.
5. Programa para determinação do modelo cinemático e dinâmico de manipuladores, para prover referências para o sistema de controle, simulação do comportamento do manipulador, e prover os parâmetros para a correta seleção dos atuadores.
6. Programa para prover a homogeneização da variação do tempo de amostragem não constante (veja as condições dos itens A.2.6.5 e A.3.4 do anexo A) e tem finalidade de prover padronização das respostas e evitar apresentação de variáveis de entrada, intermediárias e de saída distorcidas.
7. Programa para "catalogação" e pesquisa em arquivos de parâmetros comerciais e técnicos de atuadores, obtidos por ensaios, testes e medidas de laboratório ou catálogos de fabricantes, com definição de orientação, posicionamento relativo, e sistema de coordenadas de cada parte dos atuadores.
8. Programa de análise dos tipos de atuadores, motores e redutores, ou similares existentes no mercado ou na bibliografia, visando enriquecer o trabalho, e prover fonte de pesquisa e variedade de elementos, e seus princípios de construção operação e controle.
9. Programa de análise dos parâmetros e condições do manipulador, características de projeto, tais como evidências da configuração do projeto, como compensação de massa, de atritos, e otimização da estrutura, bem como do tipo de acionamento na escolha dos atuadores.

Um dos procedimentos necessários no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa foi a otimização do sistema de acionamento do manipulador, o que consiste na realização de uma gama de possibilidades de decisões que podem ser tomadas, inclusive serem utilizadas simultaneamente, conferir no diagrama de metodologia da figura 1.5. Este organograma esquematiza os possíveis caminhos ou metodologia para realização do sistema de atuadores.

1. A pesquisa de custo na compra dos equipamentos de acordo com as condições financeiras do fabricante ou comprador que trabalha com o manipulador.
2. Escolha do tipo de redutor de velocidade adequado, que pode usar transmissões por engrenagens, *harmonic drives*, eixos, cabos, colunas de líquidos e similares.
3. Redução das perdas do sistema através do sistema de acionamento dos atuadores. [TRZYNADLOWSKI, 88] indica três caminhos para resolver este problema que podem ser tomados simultaneamente: pelo projeto e seleção do atuador; pela melhoria da forma de onda do suprimento de potência; e pela redução das perdas através do controle. O projeto e seleção do atuador é a mais importante para se realizar isto, e consiste na otimização do projeto, e na seleção adequada dos atuadores.

A) A otimização do projeto do atuador pode se dar por três caminhos: criação de novos tipos e princípios de funcionamento de atuadores especializados para manipuladores; melhoria e qualificação dos princípios de operações dos atuadores tradicionais; e a procura de desenvolvimento do utilização de novos materiais de elevada densidade magnética.

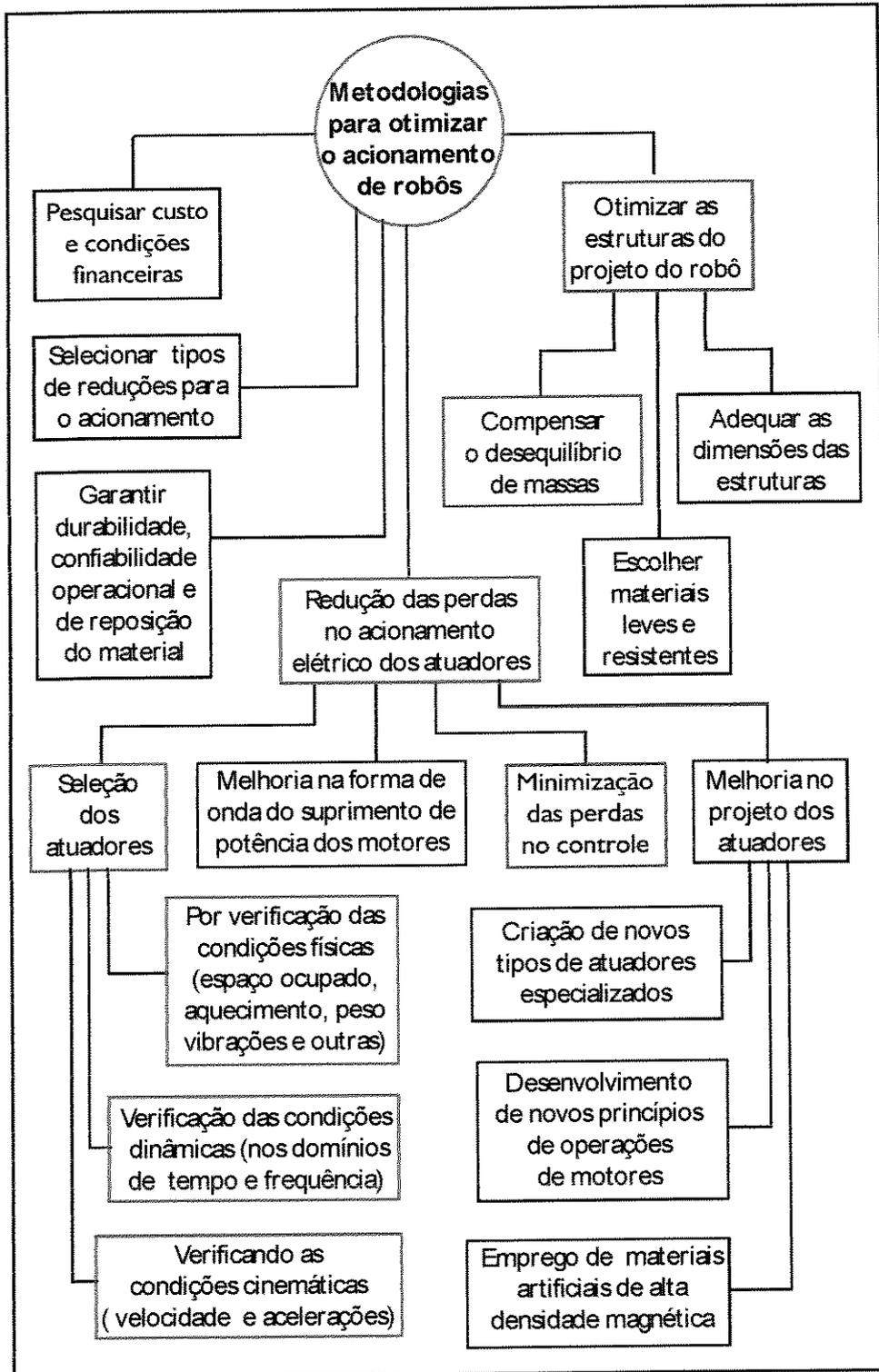


Figura 1.5: Metodologia para otimizar acionamentos de robôs.

B) A seleção, especificação ou escolha de atuadores para o manipulador, pode tomar três caminhos principais, que são: verificação das condições dinâmicas no domínio do tempo e da frequência; análise das condições cinemáticas como velocidade e aceleração; e análise das outras condições físicas tais como, dimensões espaciais (volume, comprimento e área) ocupadas, peso, inércia, aquecimento, e vibrações.

4. O aumento da vida útil do manipulador, poderá ser realizado pela escolha de equipamentos, cujo mercado permite uma rápida reposição, e que apresenta grande confiabilidade.
5. E finalmente, em último lugar, a otimização da estrutura do manipulador, que poderia ser realizada através da compensação estática e/ou dinâmica total e/ou parcial do desequilíbrio das massas, dos elos com suas cargas em torno dos eixos; escolha de materiais mais leves e resistentes para compor a estrutura dos elos e a otimização das dimensões da estrutura.

1.4 Conteúdo geral da tese

O conteúdo geral deste trabalho, está dividido em cinco capítulos que apresentam basicamente o desenvolvimento teórico, a descrição dos programas e algoritmos desenvolvidos, e os principais resultados obtidos para a temática proposta.

No capítulo 1, faz-se o posicionamento do problema projeto de manipuladores voltado para a seleção de atuadores, apresentando-se a metodologia, metas e motivação relacionada com o problema..

No capítulo 2 estão sintetizados os aspectos referentes a geração de trajetória, modelagem cinemática e dinâmica dos manipuladores. Introduziu-se uma nova classificação que insere informações sobre tipo do acionamento e a situação dos atuadores, além do tipo de cada junta. Equaciona-se e discute-se o problema do desequilíbrio dos torque de gravidade em torno dos eixos das juntas, e da compensação destes torque que influenciam na dinâmica das estruturas e conseqüentemente no dimensionamento dos atuadores. Este capítulo é importante porque apresenta a solução para o problema da incorporação dos parâmetros das estruturas dos atuadores e seus acessórios na estrutura dos manipuladores, durante o processo de seleção destes atuadores, conforme o tipo de acionamento de cada junta e sua distribuição na estrutura dos manipuladores. E finalmente, sobre tudo isto, nele são feitos comentários sobre a programação específica destes problemas.

O capítulo 3, concentra-se no acionamento a nível de junta, destacando de forma geral o equacionamento de um modelo de junta, bem como apresenta um estudo bibliográfico sobre os diversos tipos de atuadores (motores e redutores) e as tendências futuras para serem utilizados como servoatuadores. O principal assunto deste capítulo é a questão da seleção de atuadores para manipuladores, enfatizando os processos tradicionais, sugestões e metodologias, considerando os tipo de acionamentos básicos das juntas convencionais, bem como a programação relacionada.

Com relação ao capítulo 4, ele enfoca a simulação dos problemas discutidos. Descreve a interação dos dados relacionada com a modelagem dos manipuladores e a seleção de atuadores, apresentando e discutindo os principais resultados obtidos durante estas simulações.

Finalmente, no capítulo 5 discute-se os resultados principais, apresentando as dificuldades encontradas, conclusões e perspectivas futuras.

Logo em seguida, são apresentados, alguns anexos. O anexo A trata das características dos programas de apoio. O anexo B contém algumas listagens dos bancos de dados passados do programa de apoio para o programa de modelagem dinâmica e seleção de atuadores; as listas com respostas do programa de modelagem dinâmica; a simbologia dos operadores do aplicativo MATEMÁTICATM; e as listas dos valores típicos e nomes dos parâmetros importantes dos atuadores retirados dos catálogos.

Capítulo 2:

Modelagem de Manipuladores Robóticos

O objetivo deste capítulo é a apresentação de alguns conceitos básicos de modelagem cinemática, bem como prover uma base analítica para a determinação das equações dinâmicas de um manipulador industrial. São apresentados os conceitos básicos da robótica que serão importantes mais a frente, eles distinguem os seus componentes e sugere uma nova forma de classificação dos manipuladores.

A seguir enfoca-se o problema da compensação dinâmica do torque devido à influência do campo gravitacional nos manipuladores, e as formas de compensação destes momentos, visando reduzir as componentes de forças atuantes nas juntas dos manipuladores, otimizando a junta e reduzindo o tamanho dos atuadores necessários para acioná-las.

Em seguida são feitos comentários sobre a utilidade e o funcionamento do programa de fusão, integração e compatibilização estrutural dos elos, que é importante no processo de adaptação dos parâmetros que influem na resposta dinâmica das juntas, sendo sensíveis as alterações dos atuadores e as configurações do acionamento.

2.1 Componentes dos Manipuladores

A cadeia cinemática de um manipulador é dividida em duas cadeias básicas, uma que posiciona o elemento terminal, chamada cadeia de posicionamento, e uma que orienta este elemento terminal chamada cadeia de orientação. A cadeia de posicionamento é importante para definir a classe geométrica do manipulador. Os componentes básicos que definem o manipulador são as junta e os elos, onde um elo e uma junta definem um manipulador elementar, que possui pelo menos um grau de liberdade. A junta é a região pela qual se introduz a articulação e esforços através do sistema de acionamento, e os elos são os elementos rígidos ou as alavancas (barras ou braços) que agem, e que realizam trabalho através dos esforços impostos pelo sistema de acionamento que age através da junta.

Os elos servem para dar rigidez, sustentar a carga, a ferramenta, suportar os esforços impostos pela carga, realização da tarefa e outros elos de ordem superior na cadeia cinemática do manipulador, eles podem ser estendidos para traz e assim são utilizados também para prover compensação de desequilíbrio de massas nos eixos. Não entrar-se-á em detalhes aqui, mas existem também elos que são um pouco flexíveis. Os atuadores e equipamentos auxiliares que compõem o corpo dos manipuladores e dos sistemas de acionamento das juntas, também são geralmente sustentados pelas estruturas dos elos.

Uma junta ou também designada articulação, é o ponto de injeção externa de energia e de contato, ou troca de esforços entre os elos da cadeia cinemática. A junta pode ser caracterizada como **prismática** quando todos os pontos do elo se movimentam somente linearmente com relação à vizinhança. Se o movimento for circular, então a junta é definida como uma junta **rotacional**.

Os elos são caracterizados por ter três partes bem distintas. A **junta** é o ponto de articulação do elo, ou contato com o elo vizinho inferior na cadeia cinemática. A **haste de serviço** (ou ação) do elo, ou que sustenta o resto da cadeia acima daquele grau de liberdade, e a **haste de compensação** de desequilíbrio de momentos devido a ação da gravidade sobre das massas dos elos e de sua carga em torno dos eixos.

As juntas, por sua vez, são integradas pelo sistema de acionamento, composto pelos atuadores (motores, redutores, e transmissores de movimentos) que serão definidos e estudados no capítulo 3. O tipo de acionamento de cada junta influenciar na modelagem do manipulador através da mudança dos parâmetros da estrutura dos elos que são provocadas pelas dimensões e situações dos atuadores e seus componentes.

A escolha do tipo de acionamento pode ser realizada através de dois critérios. O primeiro é pela forma de acoplamento entre o motor e a junta, que é dividido em: **direto** onde não há acoplamento, **indireto reduzido**, cujo acoplamento reduz a velocidade, **indireto conversor** cujo acoplamento serve para converter movimento rotacional em prismático e vice-versa, e **indireto transmissor** que serve para transmitir o movimento do atuador (fonte de esforço e movimento) para a junta (ponto de aplicação remoto), sem reduzir velocidade ou converter movimento. O segundo critério é válido somente para os atuadores com acionamento indireto, e especifica a distância relativa dos atuadores com a junta acionada. Neste caso, define-se que o acionamento é **indireto remoto** quando o atuador não fica no elo vizinho da junta acionada, podendo ser até mesmo fora da estrutura do manipulador, na sua base, por exemplo, e por outro lado, o acionamento é **indireto local** quando o motor, transmissão ou redutor se localiza num dos elos da junta acionada.

As alterações introduzidas pelos atuadores, são causadas nas estruturas dos elos onde se fixam, ou na modelagem dinâmica das juntas. Isto porque um motor de acionamento indireto é estrutural e dinamicamente diferente de um motor de acionamento direto. Um motor de acionamento indireto trabalha com acessórios que os motores de acionamento direto dispensam. Estes acessórios são sensores, redutores e transmissões, e têm princípios de funcionamento diferentes, o que pode ocasionar um aumento da variação dos parâmetros estruturais e dinâmicos do manipulador e modelo, conforme a composição e configuração do manipulador escolhido.

2.2 Classificação dos Manipuladores

Os manipuladores podem ser classificados segundo diversos critérios, [SPONG, 89] tais como pela geometria da cadeia cinemática de posicionamento; fonte de potência; ambiente de atuação; tipo de controle utilizado.

O principal critério utilizado no desenvolvimento deste trabalho de tese para a identificação dos tipos de manipuladores, e empregado no algoritmo de simulação de manipuladores, é o da geometria da cadeia cinemática de posicionamento. Neste caso R indica que a junta é rotacional, e P que a junta é prismática. Assim sendo pode-se definir manipuladores do tipo: (RRR) ou **articulados** como o PUMA 560; (RRP) ou **esféricos** nos quais os eixos das juntas rotacionais consecutivas são ortogonais; (RRP) como o **SCARA** cujos eixos das juntas rotacionais consecutivas são paralelos; (RPP) ou **cilíndrico**, com apenas uma junta rotacional e finalmente (PPP) ou **cartesiano** com todos os eixos das juntas **prismáticas** consecutivas ortogonais.

No segundo critério, que classifica-os pela fonte de potência utilizada, podemos defini-los como manipuladores **hidráulicos**, **elétricos**, **pneumáticos** e mais recentemente **ultrasônicos** [AOYAGI, 91], **piezoelétricos** [KURODA, 91], **Ligas Metálicas com Memória** [BERGAMASCO 89], etc; o que não impede que um manipulador seja misto utilizando fonte de potências diferentes em cada uma de suas juntas conforme a necessidade. Ver informações e referências complementos sobre outros tipos de fontes de energia mecânica utilizado no capítulo 3, e em [SILVA, 98a].

Um outro critério de classificação de manipuladores não muito comum na bibliografia, é citado por [SPONG, 89]. Ele define o manipulador quanto a área de aplicação dentro do sistema de produção, e divide os manipuladores em associados e não associados. Os manipuladores **associados** são empregados integrados como parte do sistema de produção, tal como em linhas de montagens, eles geralmente são menores e o tipo de acionamento utilizado nas suas juntas é predominantemente elétrico ou pneumático. Caso contrário, este critério diz que os manipuladores são **não associados**, e neste caso eles são utilizados independentemente do processo, podendo ser empregados para o carregamento e descarregamento, manuseio de materiais, pinturas por **spray** e soldagens.

A estratégia de controle distingue os manipuladores basicamente em servo e não servos, veja também [SPONG, 89]. Os manipuladores **não servos** ou tipo mestre/escravo, são mais primitivos e seu controle é feito geralmente em malha aberta, exigindo motores robustos nas juntas. Os manipuladores **servos** são controlados em malha fechada. Os manipuladores que operam em malha fechada podem ser classificados pela forma com a qual o controlador guia o elemento terminal pelos trajetos exigidos pelas tarefas, podem ser divididos em manipuladores controlados **ponto a ponto**, cujo elemento terminal segue um jogo de pontos definidos, ou manipuladores controlados em **trajeto contínuo** que são aqueles onde o elemento final é controlado continuamente através do trajeto exigido pela tarefa.

2.3 Identificação das Configurações de Manipuladores

Conforme foi descrito anteriormente, dependendo da configuração de um manipulador, ele pode apresentar em seus módulos, componentes dos mais variados tipos possíveis. Assim, sua caracterização depende da identificação destes componentes para determinação de seu modelo correto. Nos algoritmos de simulação de manipuladores, veja anexo A, é importante a caracterização deles. Isto visa facilitar a interatividade do operador com o programa definindo o tipo de manipulador e identificando as juntas, o tipo de acionamento, e a posição dos atuadores na estruturas. Visando-se atender esta necessidade, foi criada a forma de identificação da configuração de um manipulador conforme a expressão seguinte.

$$(E_1 \dots E_i \dots E_n - J_1 \dots J_i \dots J_n - A_1 \dots A_i \dots A_n - M_1 \dots M_i \dots M_n),$$

onde os índices i e n correspondem respectivamente a ordem da junta acionada e aos graus de liberdade do manipulador. E , J , A e M são os itens de classificação dos graus de liberdade deste manipulador.

E_i : corresponde ao tipo de estrutura do **elo** acionado através da junta i do manipulador, que pode ser **C** **contrabalançada**, **S** **simples**, ou **P** **paralela**.

J_i : identifica o tipo de articulação da **junta** i , e pode ser **R** ou **P** conforme a junta seja respectivamente **rotacional** ou **prismática**;

A_i : identifica o tipo da **acionamento** da junta i , que pode ser **D** ou **I** conforme este acionamento seja respectivamente **direto** ou **indireto**.

M_i : identifica a situação relativa do **motor** da junta i , é uma letra ou um número que identifica a ordem do grau de liberdade ou do sistema de coordenadas do elo onde o motor da junta estiver fixado. M_i será **B** se o motor da junta estiver na base do manipulador, será **C_i** se o motor for localizado na haste de compensação do elo acionado através da junta i , e será 1, 2, 3, ... conforme a ordem i do elo onde o motor estiver fixado.

No caso, se em qualquer destes itens não for conhecida a respectiva classificação, então será usado um *times* no lugar do símbolo, para identificá-los como desconhecidos.

2.4 Planejamento e Geração de Trajetórias de Manipuladores

O **planejamento de trajetórias** é a especificação do caminho que a ponta da garra do manipulador seguirá na execução de uma tarefa. é um procedimento determinado pelo operador que indica o comportamento a ser seguido no espaço de trabalho, sendo importante tanto a nível generalizado como a nível local, para a realização do controle que necessita de referências. Por isto

serão apresentadas neste item algumas técnicas importantes para a implementação do gerador de trajetórias.

O gerador de trajetórias determina os ângulos das juntas para que a garra consiga realizar seu objetivo, e para tal, pode ser implementado usando um método de inteligência artificial, como a busca heurística, redes neurais, geometria do manipulador ou métodos analíticos.

A busca da operação e a compreensão do funcionamento da geração de trajetórias vem gerando teses como é o caso de [MADRID, 94], que trabalhou na elaboração de um gerador de trajetórias empregando busca heurística. Em [NOGUEIRA, 95], apresenta-se o uso do *joystick* (mouse espacial) para geração de trajetórias num sistema do tipo mestre/escravo, utilizado para controle de orientação da garra de um manipulador da PETROBRASTM.

[CRAIG, 89], apresenta-se duas formas simples de planejar a trajetória de um manipulador, determinando a partida de um ponto e a chegada em outro, no plano, estabelecendo velocidade, posição, aceleração e desaceleração. Na primeira forma, ele divide o percurso em trechos que empregam funções específicas que definem a trajetória em posição, velocidade e aceleração, e na segunda forma ele usa aproximação polinomial que define estes parâmetros como um perfil contínuo para todo o percurso. Estas duas formas foram empregadas neste trabalho de tese.

O manuseio do *joystick*, [NOGUEIRA, 95], serve para orientar a garra do manipulador gerando as referências de orientação da garra em escala, e um computador efetua os cálculos dos ângulos de juntas (cinemática inversa), que são transmitidos aos controladores dos atuadores, fazendo com que a garra siga os movimentos feitos através do *joystick* em tempo real.

2.4.1 Técnicas de Implementação de um Módulo de Geração de Trajetórias

Uma outra forma de se planejar a trajetória da garra de um manipulador, é através da imposição de um perfil de velocidade, visando um consumo de energia mínimo para cada junta, quando se conhece as posições iniciais e finais de cada junta, o que pode ser feito através de simulações, e cinemática inversa, como será mostrado no item 4.5. Este tipo de procedimento é eficiente para sistemas com carga e velocidades constantes, como é o caso de impressoras, robôs autônomos, [DC MOTORS, 73]. Quando isto é aplicado em manipuladores, cujas juntas agem em direções diferentes daquelas da trajetória da garra, as trajetórias se desviam daquelas previstas, desejáveis, esperadas ou impostas nos pontos intermediários do percurso, o que torna esta técnica contra indicada para casos onde os modelos são não lineares e é desejado que a ponta da garra siga uma trajetória específica.

Outro princípio utilizado, veja [MADRID, 94], consiste na produção analítica do traçado da tarefa representada por três equações espaciais parametrizadas em função do tempo. O acesso as equações das trajetórias pode ser direto, através da digitação da formula da condição desejada, que deve ser interpretada pelo programa.

Este acesso ao equacionamento da trajetória pode ser também indireto, e empregar

procedimentos de computação gráfica que apontem para **um grupo de equações paramétricas** ou **o desenho de um perfil específico arquivado em memória**, que definem uma trajetória específica escrita no corpo do programa, entre diversas outras mostradas dentro do que definiu-se como módulo de tarefas.

Aqui são sugeridos cinco modos de acesso indireto, os três primeiros ilustrados pela figura 2.1. No primeiro modo pode-se usar botões ou ícones que, quando selecionados pelo *mouse* ou teclado, ativam a tarefa do grupo de equações correspondente desejado, que fica representativamente desenhado ao seu lado, como ilustrado nas colunas 1 e 3 da figura 2.1.

1		$x = 1.\cos(t)$ $y = 3.\cos(t)$ $z = 0$
2		$x = 1,3.\cos(t)$ $y = 1,3.\cos(t)$ $z = 0$
3		$x = 0,5.t$ $y = 0,4.t$ $z = 0,2.t$

Figura 2.1: Seleção da trajetória da garra por botões, ícones, figuras e teclas

No segundo modo, estes mesmos botões ou ícones podem estar relacionados com a tarefa desejada cujo desenho representativo fica ao seu lado, como mostrado pelas colunas 1 e 2 da figura 2.1. No terceiro modo, os números ou letras ficam relacionados com os desenhos das tarefas ou suas equações, e a seleção de um deles é feita apertando a tecla correspondente a letra ou número do lado da tarefa escolhida, como ilustrado nas colunas 1 e 2 ou 1 e 3 da figura 2.1.

No quarto modo, que é originalmente sugerido aqui, são desenhadas três janelas que contém os planos das três vistas (*xy*, *yz*, e *zx*), respectivamente indicadas pelas figuras 2.2a 2.2b e 2.2c, do desenho espacial da tarefa representadas no volume de trabalho, vide figura 2.2d. Neste caso, o operador do robô deve seguir as normas de desenho técnico para produzir as três vistas planas do formato da tarefa, através de *mouse*, mesa digitalizadora, ou capturando o desenho pronto, através do *scanner*, ou uma câmera especial, para cada um dos quadros ou janelas mostrados no vídeo de um computador, como mostrado na figura 2.2. A interpretação destas figuras poderia ser feita através de um programa de computador, e utilizando o mesmo procedimento de interpretação de desenhos técnicos de peças mecânicas, e que permitiriam a reconstrução do desenho espacial da trajetória, como mostrado na figura 2.2d. Nestes casos seriam inseridos alguns sinais característicos no desenho, os quais indicariam o início e final da trajetória, o sentido do deslocamento, e o valor do tempo de execução da tarefa, utilizando-se técnicas de reconhecimento de padrões.

Num quinto modo, que é uma variante do quarto, sugerimos que nos três quadros

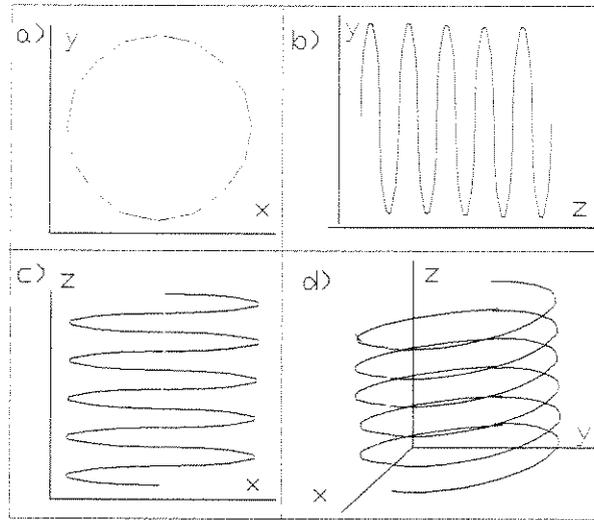


Figura 2.2: Determinação da trajetória da garra pelo desenho das vistas espaciais

mostrados sejam desenhadas as três equações parametrizadas $x(t)$, $y(t)$ e $z(t)$ em função do tempo (t), como ilustrado na figura 2.3.

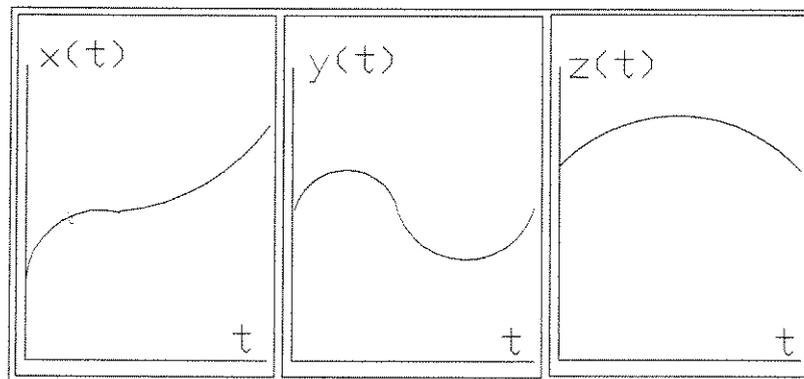


Figura 2.3: Determinação da trajetória da garra, pelo desenho das curvas paramétricas

Neste trabalho de tese, foram empregados o primeiro e terceiro modo e também as duas formas sugeridas por [SPONG, 89]. A curva da variação tempo para uma equação paramétrica da trajetória de um robô real, exige um perfil de velocidade sem degraus, uma vez que a descontinuidade desta forma seria fisicamente impraticável para execução em um robô real, porque a juntas e seus atuadores possuem inércia e atrito que amortecem o movimento impedido que o sistema reaja bruscamente seguindo degraus impostos pelas referências.

Esta construção pode empregar uma **variação de tempo Δt constante** ou homogênea, determinado um perfil de Δt através do tempo, que é chamado de **perfil de variação de tempo**, e que neste caso é constante para toda a trajetória. Por outro lado nada impede que os Δt 's

através do percurso desejado sejam **variáveis** ou heterogêneos, casos em que o perfil de variação de tempo pode assumir formatos desejáveis, e a soma de todas as variações de tempo ou Δt 's durante o percurso, deve ser igual ao tempo total desejado para a realização da tarefa, para que se tenha a garantia de que o percurso seja percorrido com precisão. Caso contrário, o elemento terminal pode não chegar, ou passar do ponto desejado no final da trajetória. Esta técnica é explicada com maiores detalhes com a explanação do algoritmo de simulação dos manipuladores no anexo A.

Neste trabalho, isto foi feito somente a título de ilustração, e por esta razão, como será mostrado nos resultados dos itens 4.3.3 e 4.3.4 do capítulo 4, não se preocupou com este problema nas simulações, onde para cada equação paramétrica foi imposto basicamente quatro tipos de perfis opcionais para a variação de tempo de amostragem, constantes, parabólicos, trapezoidal, ou triangular.

As equações paramétricas permitem com facilidade, a formação de uma trajetória espacial em função do tempo. Nos resultados onde esta técnica foi empregada, ver-se-á que quando o perfil de tempo tende a zero (como intensionalmente utilizado), ocorrem distorções nos perfis de velocidades e acelerações, veja também itens 4.3.3 e 4.3.4 do capítulo 4. Isto ocorre porque a velocidade é a derivada do deslocamento x em relação ao tempo t , que se tornaria desconhecida ao assumir valores elevados, ($\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{dx}{dt} = \infty$).

2.5 Modelagem Cinemática de Manipuladores

Através do planejamento da geração da trajetória do manipulador, é possível determinar o percurso e os deslocamentos feitos pela ponta da garra, e associando isto a cinemática inversa, o conhecimento das variáveis das juntas. O conhecimento das variáveis de juntas permite a determinação dos ângulos, velocidades e acelerações das juntas, usando-se métodos numéricos, dispensando-se o uso da cinemática de velocidade. Isto porque se pode conhecer a variação de tempo entre cada amostragem. Mas é importante ver como se determina o modelo cinemático de um manipulador, para que se possa compreendê-lo melhor.

Antes de mostrar a resolução do modelo cinemático inverso, apresentar-se-á uma idéia da resolução do modelo cinemático direto que ajudará a compreender a cinemática inversa, e de velocidade, e também das matrizes de orientação do elo em relação ao sistema referencial na modelagem dinâmica, que também será apoiada na cinemática de velocidade através do jacobiano que é importante para a determinação dos termos inerciais e dos Símbolos de Christoffel.

2.5.1 Cinemática Direta

A análise da cinemática direta permite que se possa conhecer a posição cartesiana X do elemento terminal de um sistema robótico qualquer em função de suas variáveis de junta q e a orientação de $X = F(q)$, maiores detalhes ver [SPONG, 89]. Isto pode ser facilmente determinado

considerando-se cada junta com seu respectivo elo como um sistema celular robótico. Através das transformações homogêneas (operações que propiciam a resolução da cinemática direta dos manipuladores), se pode representar e relacionar o elo, sua junta, e seus movimentos relativamente à vizinhança. Na cinemática direta de manipuladores é usual se ter matrizes que relacionam as dimensões espaciais, entre cada parte móvel da estrutura.

O emprego da convenção de Denavit Hartenberg simplifica a determinação da matriz de transformação homogênea A_i , que relaciona cada junta e sua vizinhança e permite representar a orientação e posição de um elo relativa ao seu vizinho.

$$A_i = Rot_{z,q_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} Rot_{x,\alpha_i} = \begin{bmatrix} c_{q_i} & -s_{q_i}c_{\alpha_i} & s_{q_i}s_{\alpha_i} & a_i c_{q_i} \\ s_{q_i} & c_{q_i}c_{\alpha_i} & -c_{q_i}s_{\alpha_i} & a_i s_{q_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

onde $c_{q_i} = \cos q_i$, $s_{q_i} = \sin q_i$, $c_{\alpha_i} = \cos \alpha_i$ e $s_{\alpha_i} = \sin \alpha_i$, e α_i é ângulo de torção, q_i é o ângulo da junta, d_i é o deslocamento ou *offsets*, e a_i é o comprimento.

O produto ordenado das transformações homogêneas, de um elo j até cada elo i , definido por T_i^j , visto na equação 2.2, permite que se determine a relação entre os parâmetros daquele elo i , em relação ao sistema de coordenadas do elo j . Em particular esta transformação permite que se possa representar, por exemplo, os parâmetros de um determinado elo em relação ao sistema referencial.

$$T_i^j = \begin{cases} A_i A_{i+1} A_{i+2} \cdots A_{j-2} A_{j-1} & \Leftrightarrow i < j \\ I & \Leftrightarrow i = j \\ T_{j-1}^i & \Leftrightarrow i > j \end{cases} \quad (2.2)$$

A transformação homogênea abaixo mostra as coordenadas cartesianas d_0^n e a orientação R_0^n elemento final em função do vetor das variáveis de juntas $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_i, \dots, q_n)^T$.

$$T_0^n = T_0^i = A_{i-1}^i T_0^{i-1} = \begin{bmatrix} R_0^n(\mathbf{q}) & d_0^n(\mathbf{q}) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

2.5.2 Cinemática Inversa

Quando a garra segue uma trajetória real, prática e visual, para cada ponto desta trajetória haverá uma posição e orientação em relação ao seu elemento terminal, e para que isto ocorra cada junta terá um ângulo específico, (é evidente que ela poderia fazê-lo com outras combinações de ângulos entre as juntas, como mostrado através do modelo planar de três graus de liberdade, onde para uma mesma posição da ponta e orientação da garra, ele pode assumir uma configuração

com o cotovelo para cima e outra com o cotovelo para baixo, como é mostrado no capítulo 4 que pode ser constatado nas figuras 4.5c e 4.5d, embora com modelos diferentes:) A cinemática inversa $q = F^{-1}(X)$ consiste na determinação das variáveis (ângulos) de juntas q a partir do conhecimento da posição e orientação da garra X ou elemento terminal, referidas ao sistema de coordenadas inercial ou da base, [SPONG, 89].

Conhecendo-se os elementos da matriz de orientação e posição determinados pelas condições de operação do robô, a expressão analítica da cinemática inversa poderia ser facilmente encontrada em algumas circunstâncias. Quando o manipulador tem poucos graus de liberdades, torna-se mais fácil a determinação de uma solução satisfatória do problema inverso através da geometria do manipulador.

Quando o número de graus de liberdade é suficientemente grande, sem redundância, dividido em duas cadeias (de posicionamento e de orientação), pode-se chegar a uma solução mista entre uma solução algébrica e uma solução geométrica [NOGUEIRA, 95].

Normalmente a cadeia de orientação possui os eixos concêntricos. No caso de um punho ser esférico e se for utilizada a convenção de Denavit Hartenberg para encontrar a cinemática direta, os eixos z das três últimas juntas coincidirão com o centro de coordenadas da garra, podendo ser encontrado através da equação 2.4. Assim, para uma cadeia posicionamento de um manipulador de seis graus de liberdade que tem de três graus de liberdade, as variáveis de junta da cadeia são determinadas com o auxílio da geometria, e da resolução da equação 2.5.

$$p_c = \mathbf{d} - d_n \cdot R \cdot \mathbf{k} \quad (2.4)$$

onde:

p_c representa o vetor que contém a posição do punho referenciado ao sistema inercial,

\mathbf{d} representa o vetor com as coordenadas da ponta do elemento terminal referidas ao sistema inercial,

d_n comprimento do elemento terminal referenciado ao sistema de coordenadas da última junta,

$R = R_0^n$ matriz de orientação do elemento terminal relativa à base,

\mathbf{k} , vetor unitário contendo a direção do punho referido ao seu sistema de coordenadas

n é o número de graus de liberdades do manipulador

$$R_3^n = [R_0^3]^{-1} R_0^n = [R_0^3]^T R_0^n \quad (2.5)$$

onde

$[R_0^3]^T$ é o transposto da matriz de rotação da cadeia de posicionamento e pode ser facilmente encontrada geometricamente,

R_3^n é a matriz de orientação das variáveis de juntas da cadeia de orientação.

Sabendo-se que $R_0^n = R_0^3 R_3^n$ e usando-se as regras de transformações homogêneas encontra-se a equação 2.5. Nesta matriz encontra-se os elementos de R_3^n , que podem ser comparados com a matriz da representação dos ângulos de Euler do punho ou cinemática direta da cadeia de orientação, e isto, permitindo assim a obtenção das variáveis restantes através de comparação desta, [SPONG 89].

2.5.3 Determinação dos Jacobianos

A cinemática de velocidade consiste num processo algébrico que determina as velocidades lineares V e angulares ω da garra em função das velocidades de juntas \dot{q} , referidas ao sistema da base. Esta relação é dada pelo **Jacobiano** Jx .

$$\begin{pmatrix} V \\ \omega \end{pmatrix} = Jx\dot{q}. \quad (2.6)$$

Há uma parte do jacobiano para determinação da velocidade translacional Jv e outra para a velocidade rotacional $J\omega$, assim se pode escrever a equação 2.7 genérica de velocidade angular e cartesiana para cada elo. No caso particular da garra ($i = n$), fica determinada a cinemática de velocidade.

$$\begin{bmatrix} V_0^i \\ \omega_0^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Jv \\ J\omega \end{bmatrix} \dot{q} \quad (2.7)$$

Os jacobianos assumem formas diferentes para juntas prismáticas e rotacionais. O jacobiano para velocidades angulares e lineares de cada elo i é dado pela equação 2.8, onde os elementos J_i para juntas prismáticas é dado pela equação 2.9, e para juntas rotacionais pela equação 2.10. o_i e z_i são os três primeiros elementos respectivamente das colunas 3 e 4 das matrizes de transformações lineares, o_n são as coordenadas dos centros de massas dos elos. o_i são as coordenadas do ponto final, e z_i as orientações de cada elo, que são determinados pelos três primeiros elementos respectivamente das colunas três e quatro das matrizes T_0^i .

$$Jx = [J_1, \dots, J_i, \dots, J_n] \quad (2.8)$$

$$J_i = \begin{bmatrix} Jv_i \\ J\omega_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$J_i = \begin{bmatrix} Jv_i \\ J\omega_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (\mathbf{o}_n - \mathbf{o}_{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Como sugerido em [SPONG, 89], os vetores θ_i e z_{i-1} podem ser retirados da matriz de transformação homogênea T_0^i que relaciona dois sistemas de coordenadas, e está representada na equação 2.11. Estes vetores são de ordem três por um, e z_{i-1} é um vetor que contém os elementos das três primeiras linhas da quarta coluna, e \mathbf{o}_{i-1} contém os três elementos das três primeiras linhas da terceira coluna da matriz T_0^i . O_n pode ser as coordenadas de centro de gravidade ou outro ponto do elo ou garra que se está procurando a velocidade.

$$T_0^i = \begin{bmatrix} r_{11i} & r_{12i} & r_{13i} & x_g \\ r_{21i} & r_{22i} & r_{23i} & y_g \\ r_{31i} & r_{32i} & r_{33i} & z_g \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Outros aspectos relacionados a determinação da cinemática de velocidade estudados por diversos autores [SPONG 89], e [CRAYG 89], que não são tratados aqui são: as singularidades, desacoplamento do sistema, verificação do número de soluções do problema para determinar as acelerações diretas e inversas.

2.6 Modelagem Dinâmica dos Manipuladores

No processo de escolha de atuadores quando considerado o modelo dinâmico, torna-se imprescindível o reconhecimento e distinção das influências mecânicas e eletromagnéticas que variam de um suposto atuador para outro, em função das características do tipo de acionamento, e da localização dos atuadores em cada elo em que se apoiam estruturalmente. As partes dos atuadores de cada junta, podem estar situadas dentro ou fora da estrutura dos elos dos manipuladores independente da junta que acionam. Isto requer a integração de seus parâmetros aos elos que devem manter, e assim viabilizar a compatibilidade matemática para a correta modelagem dinâmica do manipulador.

O acionamento de cada junta pode ser direto ou indireto. Os atuadores compostos de motores, redutores e transmissões, impõem o movimento das juntas e fazem cada elo sustentar as solicitações impostas pelas tarefas. No caso de acionamento direto, emprega-se somente motores para acionar a junta, um dos componentes do motor, seja o rotor ou estator, é incorporado ao elo (i), e o outro ao elo ($i-1$), vizinho através da junta i que fica entre os dois. Se o acionamento é indireto, os motores têm seus esforços e velocidades modificados pelos redutores e/ou transferidos pelos transmissores, e geralmente se localizam, ou estão apoiados integralmente, em elos diferentes daquele que acionam, podendo estar até mesmo na base (ou fora da estrutura móvel do robô), sem influenciar na estrutura dos elos, e portanto no modelo dinâmico. Isto decorre das influências

estruturais das partes dos atuadores no elo de apoio devido às alterações dos parâmetros geométricos dos elos.

Um dos principais aspectos da seleção de atuadores a ser verificado, é a capacidade do atuador daquela junta sustentar toda a carga que a junta requer durante a realização da tarefa pelo manipulador. Para verificar isto, há uma necessidade de determinar-se as equações dinâmicas das juntas e isto é conseguido pela resolução do modelo dinâmico do manipulador.

Há diversas opções para resolver o modelo dinâmico e as mais conhecidos, são através das leis de Newton, princípio de D'Alambert, equações de Euler-Lagrange, formulação de Newton-Euler entre outros. A partir daqui serão desenvolvidas as equações de Euler-Lagrange, que culmina no modelo dinâmico mostrado na equação 2.12.

$$T_k = \sum_j d_{kj}(\mathbf{q})\ddot{q}_j + \sum_{i,j} c_{ijk}(\mathbf{q})\dot{q}_i\dot{q}_j + \phi_k(\mathbf{q}), k = 1, \dots, n \quad (2.12)$$

onde q, \dot{q} , e \ddot{q} , são respectivamente as variáveis de juntas, posição e suas derivadas primeira e segunda, e i, j, k são índices que indicam as juntas a que se referem as variáveis.

O termo $\phi_k(\mathbf{q})$ da equação acima e que é mostrado na equação 2.13, é o torque ou esforço devido a ação da gravidade sobre a estrutura do manipulador, e é determinado conforme a equação 2.14, pela derivada da energia potencial V , devido as contribuições das massas do elo k , e demais que estão sobre ele e da carga do manipulador.

$$\phi_k(\mathbf{q}) = \frac{\partial V}{\partial q_k} \quad (2.13)$$

$$V = \int_V \mathbf{g}^T \mathbf{r} dm = \mathbf{g}^T \mathbf{r}_{cm} m \quad (2.14)$$

$d_{kj}(\mathbf{q})$, são elementos da matriz de inércia $D(\mathbf{q})$ mostrada na equação 2.15, determinada em função da energia cinética $K = 0.5\dot{\mathbf{q}}^T D(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$.

$$D(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^n [m_i J_{v_{ci}}(\mathbf{q})^T J_{v_{ci}}(\mathbf{q}) + J_{\omega_i}(\mathbf{q})^T R_i(\mathbf{q}) I_i R_i(\mathbf{q})^T J_{\omega_i}(\mathbf{q})] \quad (2.15)$$

onde:

J representa o jacobiano, ω é velocidade angular,

v é velocidade linear,

X^T é a transposição de uma matriz genérica X ,

m_i é massa do elo i ,

R_i é a matriz de rotação do elo i em relação ao sistema inercial, e

I_I é a matriz dos momentos inerciais em torno do centro de massa .

Os termos $c_{ijk} = c_{jik}$ da equação 2.12, são determinados pela equação 2.16 e são chamados **Símbolos de Christoffel**, e estão relacionados com a determinação dos contribuições das esforços de Coriolis e Centrífugos.

$$c_{ijk} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{2} \left[\frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right] \quad (2.16)$$

Matricialmente, e para efeito de representação genérica, pode-se dizer que o modelo dinâmico do manipulador pode ser representado pela equação 2.17, onde $\mathbf{G}(\mathbf{q})$, representa os esforços devido a energia potencial gravitacional, $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}$ representa os esforços devido as forças de coriolis e centrífugas, e $D\mathbf{q}(q)\ddot{\mathbf{q}}$ as forças inerciais.

$$T_k = D\mathbf{q}(q)\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + T_P \quad (2.17)$$

Neste capítulo foi apresentado o equacionamento para resolução do modelo dinâmico de um manipulador, sendo que para isto é necessário calcular os esforços das juntas, [SPONG, 89]. A seguir, é apresentado um algoritmo para resolução do modelo dinâmico visando prover parâmetros para a seleção de atuadores para uma junta robótica, como será definido no capítulo 3. Mas o entendimento desta modelagem ajudará compreender e explicar as estratégias de controle que serão apresentadas no final deste capítulo, e que será muito útil para prover em conjunto com a simulação cinemática, referencial de esforços para prover controle de força de num manipulador ou suas juntas.

2.7 AMODIRO - Algoritmo de Modelagem Dinâmica de Robôs Rígidos

A princípio, buscou-se compreender a modelagem dinâmica com a análise do manipulador JECA II de cinco graus de liberdade, em fase de desenvolvimento no DSCE - Departamento de Sistemas de Controle de Energia da FEEC - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas, ver [SILVA, 98d]. Entretanto foi adotado como referência para validação do modelo dinâmico, os parâmetros e características do modelo planar de três graus de liberdades definidos em [LATRE, 88 e 89].

A modelagem dinâmica deve ser precedida pela adaptação estrutural e compatibilização dos parâmetros decorrentes da seleção de atuadores, onde, cada parte do sistema de acionamento seja motor, redutor ou transmissão, é buscada numa lista, onde ficam catalogados os parâmetros deles. O processo de seleção recorre sempre a esta lista, motor por motor, experimentando-os pela

incorporação na estrutura dos elo em que devem se apoiar, modificando assim os parâmetros físicos deste elo, que influem no modelo dinâmico e conseqüentemente nos limites de esforços (valores de picos, eficazes e médios), que são utilizados no processo de seleção de atuadores, veja também [SILVA, 98f, g,i,j,k,n].

Há princípios físicos e métodos matemáticos bem definidos propostos para solucionar o problema da modelagem dinâmica. Como exemplo, [POTKONJACK 89] usa a modelagem dinâmica na determinação dos esforços para a escolha de motores, [KHATIB 87] trabalha com controle de esforços de robôs, que também requerer a determinação da equação dinâmica.

Existem diversos caminhos para a obtenção do valor ou expressão algébrica para a correta determinação dos esforços das juntas de um manipulador por computador. Pode-se empregar o método de Euler Lagrange [SPONG 89], a formulação de Newton Euler [CRAIG 89] e [SPONG 89], as equações de Newton, o princípio de D'Alambert, e outros.

Nesta tese enfoca-se o emprego do método de Euler Lagrange seguindo o método estabelecido no capítulo 6 de [SPONG 89], e cujas equações são apresentadas nas seções anteriores juntamente com a modelagem cinemática. Este esquema é semelhante àquele usado também por [POTKONJACK 89] para a escolha de atuadores para manipuladores, ele exige o uso do jacobiano, diferenciando-se dos princípios tradicionais apresentados por [ARMSTRONG 86], [IZAGUIRRE 86], [NEUMAN 87], e [LEU 96] que fazem o uso de múltiplas derivações diretas das matrizes de transformações homogêneas para atingir este objetivo.

O Programa de Modelagem Dinâmica de Robôs Rígidos, foi construído usando-se o aplicativo MATHEMATICATM, que é capaz de determinar o modelo dinâmico de um manipulador de graus de liberdade genéricos. A solução encontrada pode ser algébrica se os dados de entrada e/ou parâmetros empregados na resolução do modelo forem também algébricos, neste caso na saída encontra-se as equações dinâmicas de cada junta, mas se os dados de entrada ou parâmetros empregados forem numéricos, a saída será numérica e representará os esforços de cada junta para o estado representado por dados e parâmetros.

O algoritmo do AMODIRO pode encontrar soluções dinâmicas tanto para manipuladores planares como espaciais, e determina o modelo dinâmico usando-se as equações de Euler-Lagrange descritas na seção 2.5, utilizando-se somente os parâmetros estruturais dos elos. Estes parâmetros sofrem a influência de diversos fatores que podem modificar o processo de seleção de atuadores, por exemplo, os atritos nas juntas do manipulador, a compensação de massa, e a variância estrutural dos elos causada pela consideração dos parâmetros geométricos dos atuadores, os quais devem ser considerados e analisados antes da modelagem, e incorporados nos parâmetros dos elos antes da modelagem dinâmica que é resolvido na seção 2.9.

A determinação automática das equações dinâmicas de manipuladores rígidos de cadeia serial é complexa quando detalhada, ver a equação do PUMA-560 com seis graus de liberdade mostrada por [NEUMAN-87]. Mas ela pode se tornar tão simples quanto a equação 2.17 quando se empregam as técnicas, princípios, e métodos corretos propiciados pela álgebra, mais as sofis-

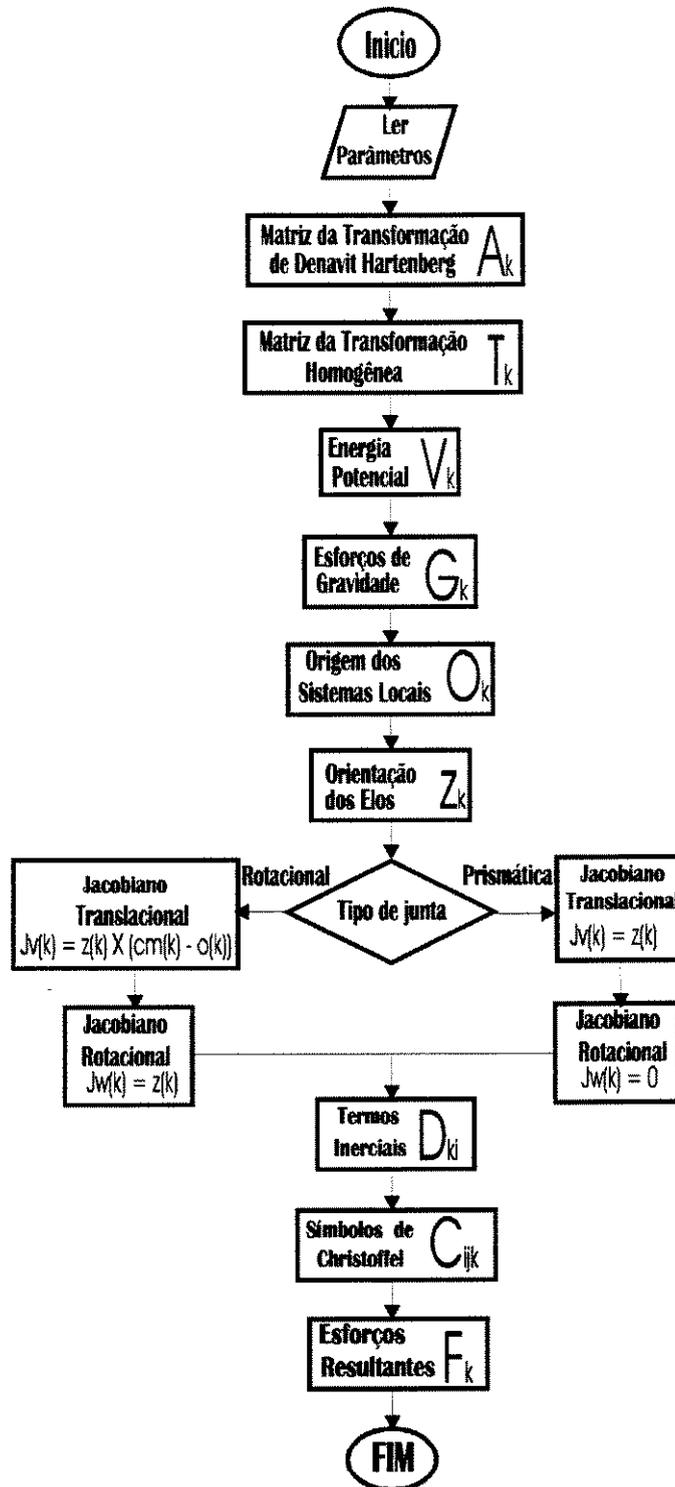


Figura 2.4: Fluxograma Geral do AMODIRO.

ticações da informática e seus aplicativos tais como o MATHEMATICATM, MATLABTM e/ou SIMULINKTM, associados também a rapidez dos computadores atuais.

O programa de seleção de atuadores recorre ao programa de geração automática da equação dinâmica, por $n+1$ vezes, onde n é o número de graus de liberdade do manipulador. O programa de modelagem dinâmica tem a desvantagem de gerar um programa que depende sempre do ambiente do MATHEMATICATM, no qual foi escrito ver [WOLFRAM 95]. Entretanto, apresenta duas vantagens operacionais para modelagem dinâmica, uma é a habilidade de gerar equações algébricas e a outra é a existência de uma grande quantidade de operadores e funções matemáticas arquivados em bibliotecas, que são chamadas por macros, como \ll *LinearAlgebra*'*CrossProduct*' \gg , que contém entre outras a função que permite o cálculo vetorial.

A modelagem dinâmica começa com a **leitura do banco de dados** contendo os parâmetros do manipulador e das matrizes de transformações homogêneas de Denavit Hartenberg $A_i = A_{(i-1)}^i$, o qual é gerado através do programa AAMMOVISA compilado em Turbo CTM como apresentado no anexo A. Logo após são determinadas, como mostra a equação 2.1, as matrizes A_i que relacionam os elementos do elo i ao sistema de coordenadas elo $(i-1)$.

Em seguida, vem as **transformações homogêneas entre os elos e a base**, dadas pela equação 2.2, depois obtém-se a **energia potencial** pela equação 2.14, e em seguida os **esforços de gravidade** conforme a equação 2.13.

O conhecimento da matriz representada pela equação 2.2, leva a obtenção das coordenadas de posição e de orientação dos elos dadas respectivamente pela terceira e quarta colunas destas matrizes, como mostrado também em [SPONG, 89]. A partir das mesmas torna-se possível a determinação dos passos seguintes que são o conhecimento dos jacobianos rotacionais e translacionais, vide equações 2.8, 2.9, 2.10 de cada junta, que são determinadas de formas diferentes conforme o tipo de junta a ser acionada, (prismática ou rotacional).

Com a determinação dos jacobianos fica fácil a determinação dos termos inerciais dados pela equação 2.15, e depois de encontrar suas derivadas que são empregadas para determinar os coeficientes de Christoffel conforme a equação 2.16.

Finalmente, conhecido o torque de gravidade, determinados os termos inerciais, e coeficientes de Christoffel, pode-se encontrar os esforços do robô segundo a equação dinâmica, veja equação 2.17,

2.8 Influência da Ação do Campo Gravitacional sobre o Modelo Dinâmico dos Manipuladores

Os esforços G devido ao campo gravitacional ou **torques de gravidade**, geralmente são os componentes que requerem os mais intensos esforços dos atuadores acionando cargas que não se encontram em queda livre nos campos gravitacionais, mesmo apesar da compensação estática total

de massa que aumenta os momentos de inércia, ou da compensação dinâmica que, exigem maiores esforços e portanto robustez do atuador para acelerar e desacelerar as cargas sobre a influência deste campo.

Portanto, G é um fator importante na determinação do tamanho dos motores. Eles são produzidos pelo desequilíbrio das massas de diversos ou n dispositivos integrantes do sistema, fixados em diversos **pontos dos elos**, que comportam como alavancas de sustentação de comprimento generalizado l_i (distância mínima entre o ponto de aplicação e o eixo da junta acionada) para as massas destes dispositivos representadas genericamente por m_i , e sobre um ângulo θ_i em relação à linha horizontal (que é ortogonal às linhas do campo gravitacional de aceleração local g_i), o que produz a expressão $G = \sum_{i=1}^n l_i \cdot m_i \cdot g_i \cdot \text{sen}(\theta_i)$.

Assim, um manipulador sofrerá influências do torque de gravidade em torno das juntas, a menos que o mesmo esteja em algum lugar onde a aceleração da gravidade é nula, ou onde todas as partes do manipulador sofrem ação externa unicamente desta componente, ou seja, em queda livre. Em [SILVA, 98o], mostra-se que os torques de gravidade causados pela má distribuição de massas nos elos em torno dos eixos das juntas, podem ter seu efeito anulado em função da redistribuição das massa existentes ou inserção de contrapesos em pontos estratégicos na estrutura do elos em torno dos eixos das juntas acionadas, caracterizando o que se chama de compensação estática.

2.8.1 Distribuição de Massas nos elos e a Compensação de Torques de gravidade

A Compensação dos Torques de Gravidade, é a técnica de anular ou reduzir o efeito do momento ou torque resultante devido à ação da aceleração da gravidade local, que age sobre as massas dos elos. Ela pode ser classificada de três maneiras: pela **natureza física** que por sua vez pode ser dividida em estática, e dinâmica (controlada) [MACHADO 96], pelo **efeito causado**, que pode ser total ou parcial, e pela **técnica usada**, quantidade de massa, localização das massas, ação integrada do conjunto (inteligente), ou mista.

Neste trabalho é comentado e analisado somente compensação estática, parcial ou total, usando localização das massas dos dispositivos na estrutura, ou quantidade de massa, veja seção 3 em [SILVA, 98o].

A presença de um campo gravitacional produz um torque de gravidade G , significativamente maior do que os momentos de inércia M do sistema, isto motivou a elaboração do estudo sobre a compensação do momento de gravidade apresentado aqui e na seção 3 de [SILVA, 98o].

A compensação usando acréscimo de massas pode diminuir ou eliminar o torque gravitacional, mas pode aumentar o torque de inércia, o que nos leva a concluir que há um ponto de equilíbrio onde esta técnica pode deixar de ser vantajosa.

Dependendo da configuração da cadeia cinemática do manipulador, o torque de gravidade pode se anular, isto ocorre, por exemplo, quando os centros de massas e os eixos da cadeia do manipulador ficam alinhados na vertical com as linhas do campo gravitacional local, e apoiados

diretamente sobre a base. Assim o efeito da gravidade se limitará a contribuir para o acréscimo das forças normais sobre as partes estáticas das estrutura, ou móveis, como fusos, engrenagens e polias podendo aumentar as forças de atrito nos contatos delas.

Assim, para os manipuladores da figura 2.5, onde l_i, n_i, m_i , e B_i representam respectivamente os comprimentos dos elos, as relações entre os comprimentos das hastes dos elos e hastes de compensação, as massas dos elos e a massa total acionada pelas juntas. O efeito da compensação pelo acréscimo de massa nos elos além de contribuir para o aumento dos torques inerciais, contribui também para o aumento dos torque de atrito, piorando a dinâmica das juntas, ver figura 2.5b. O uso de uma alavanca com um contrapeso para balancear elo, poderia auxiliar, mas quanto maior for a alavanca ou a haste de compensação, menor será a liberdade do elo, ver figura 2.5c. Desta forma, a técnica da modificação da localização das massas dos componentes dos elos seria a mais indicada.

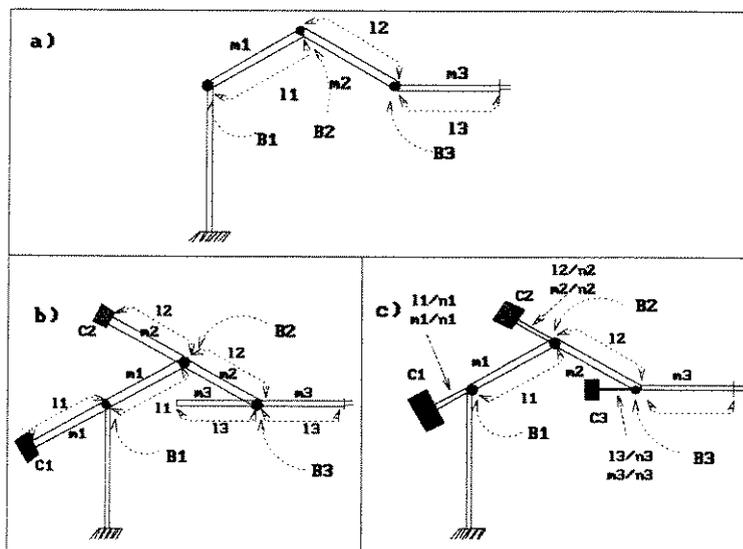


Figura 2.5: Compensação, a) ausente, b) por extensão c) por Contrapeso.

2.8.1.1 Aplicação da Compensação de Torques de Gravidade nos Manipuladores

O uso dos Torques de Gravidade não é uma idéia recente, o funcionamento dos monjolos nas fazendas a milhares de anos é um exemplo prático disto. O monjolo é um dispositivo primitivo, onde uma viga horizontal é sustentada por uma coluna, dando-lhe liberdade de girar através de um eixo localizado no seu centro, numa das extremidades fica pendurado um pilão (bastão de madeira pesado que é utilizado para moer, socar e descascar cereais), e na outra extremidade fica uma concha sobre a qual, cai a água que vai enchendo o reservatório (a concha) até que o peso da água ali acumulada seja maior do que o peso do pilão.

Quando o peso da concha que retém a água supera o peso do pilão, força a descida da concha contendo água e o pilão por sua vez sobe ganhando energia potencial. Com isto, a viga e a concha que estavam orientadas verticalmente, se inclinam, e a água é derramada transportando para fora do sistema a energia potencial do lado da concha cujo peso é insuficiente para sustentar o pilão parado do outro lado da viga, o desequilíbrio entre os dois lados da viga faz o pilão descer, com isto ele transfere parte da energia potencial para a concha, e ao cair ele aumenta a velocidade ganhando energia cinética, realizando seu trabalho útil com o choque entre o pilão e o cereal. Este processo se repete continuamente, enquanto a integridade do dispositivo, o campo gravitacional, e o fluxo de água for mantido.

Baseado nesta idéia construiu-se o modelo ilustrado na figura 2.6, onde 2.6a, representa o caso em que as hastes de compensação são semelhantes às hastes ativas dos elos, e em 2.6b as hastes de compensação são reduzidas exigindo um contrapeso maior para cada junta.

Este experimento mostra que a realização da compensação do torque de gravidade na configuração, confere ao protótipo excelente equilíbrio, estabilidade, flexibilidade, manipulabilidade, hipersensibilidade as ações de agentes externos, movendo-se até mesmo com a presença de ventos, capacidade de recompor sua configuração inicial automaticamente quando as ações dos agentes externos sobre eles cessam (memória). A retirada dos contrapesos é desastrosa, prejudicando ou eliminando totalmente estas características de funcionamento, e isto é diferente para um robô manipulador.

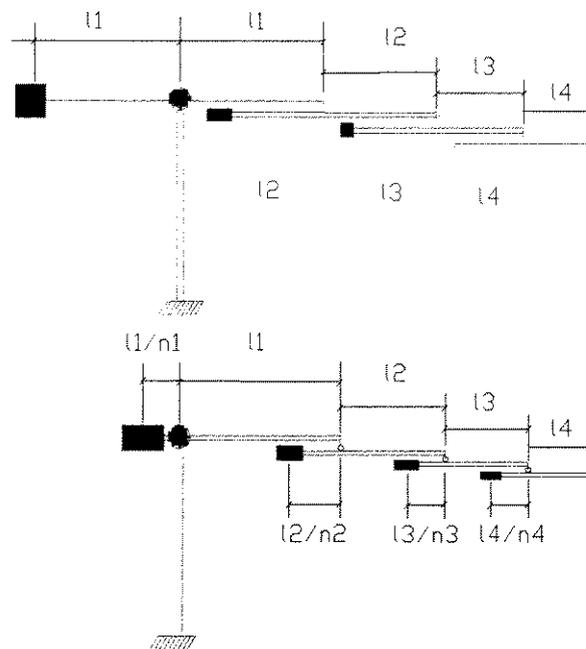


Figura 2.6: Compensação de Gravidade por aumento da: a) extensão da haste, b) massa do contrapeso.

Já foi mostrado que a compensação tem vantagens relativas. No desenvolvimento matemático do problema, em [SILVA, 98o] chegou-se a conclusão de que, caso a compensação for feita para uma junta isolada, ela apresenta vantagens, pois, diminui significativamente a carga do motor devido a anulação do torque gravitacional que é o causador predominante dos desbalanceamentos por agir num único sentido.

A ação do torque gravitacional, como já foi mencionado, ocorre sempre que há desequilíbrio de massas distribuídas em algum objeto físico que é livre para girar em torno de um eixo. Assim, se um elo girar em torno do eixo de uma certa junta, e se o respectivo motor o aciona no sentido da aceleração da gravidade, a gravidade agirá a favor da aceleração do atuador, mas se ela age no sentido contrário, produzirá um torque resistivo, que será máximo se o elo for acionado ou sustentado na horizontal (ortogonalmente ao sentido da aceleração gravitacional).

De qualquer forma, mesmo parado, se houver um comando para o sistema ocupar uma posição fixa do espaço de trabalho, o motor terá que fazer esforço muito grande para sustentar a carga devido ao campo gravitacional. Mesmo se o sistema estiver com aceleração resultante nula, e não faça esforço inercial para tal ação, ainda assim deve ser compensado por causa do momento gravitacional G .

Foi mostrado que a compensação total do torque gravitacional, através do acréscimo de contrapesos em todas as juntas do robô, aumenta significativamente as massas dos elos da junta, sobrecarregando-os.

Isto mostra, que fazer compensação total por inserção de contrapesos em todos os elos, uma vez que cada elo pode estar carregando outros, aumenta significativamente o momento inercial, visto pelos motores. Além de um certo limite, até um certo ponto que pode não valer a pena, havendo assim uma contra-indicação a este tipo de compensação, principalmente para as juntas de ordem mais elevadas, sendo muito vantajosa para as juntas de menor ordem na cadeia serial.

Considerando que uma junta é integrada por diversos componentes, um remanejamento coerente destes na estrutura deve ser feito, de tal forma que parte da massa de alguns destes componentes deixem de agir no sentido do aumento do momento de torque gravitacional, e simultaneamente, passem a agir compensando as outras massas que não podem ser redistribuídas, por exemplo por serem indispensáveis para fornecer energia, alcance e apoio estrutural para o resto da cadeia cinemática do manipulador.

Isto é ilustrado na figura 2.7, onde um motor que aciona uma junta posterior, e outras partes da estrutura que o sustenta como: placas de circuito; tomadas de energia; *encoders*; transdutores e outros dispositivos, são posicionados ordenadamente na extensão oposta do elo, distribuindo o momento gravitacional simetricamente em relação ao eixo sem a necessidade de haver acréscimo de massa nesta junta.

Suponha que o motor na figura 2.7 seja mudado em função das necessidades de uma nova tarefa imposta ao manipulador. Se o novo motor apresenta centro de massa, massa e momento

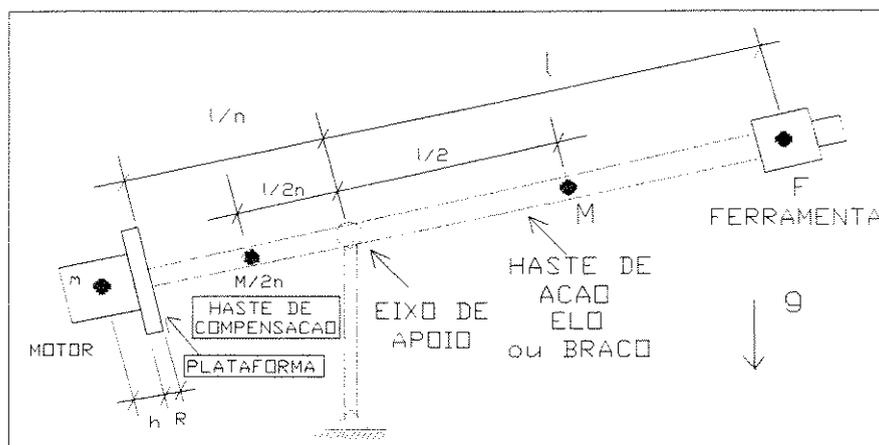


Figura 2.7: Compensação de gravidade por distribuição de massa (motor).

inercial diferentes, então a estrutura do elo e do manipulador será modificada e os parâmetros do modelo dinâmico serão alterados também. Logo, haverá necessidade de prover um modo de refazer a compensação do sistema, que é semelhante ao balanceamento de um automóvel, onde sempre que troca-se as rodas deste, precisa-se rebalanceá-las, porque cada nova roda ou pneu, tem características diferentes das anteriores. Este processo é chamado de fusão ou incorporação dos atuadores na estrutura do robô, que é realizado nesta tese através do programa AFICESE apresentado na seção 2.9.

Para melhor compreensão do que acontece, veja o exemplo da figura 2.7. Um conjunto motor junto com sua plataforma possui massa m , atua como contrapeso, e aciona uma ferramenta de massa F posicionada na ponta do braço ou elo, cuja massa é M . O motor situa-se na extremidade de uma haste de compensação de comprimento $\frac{l}{n}$, massa $\frac{M}{n}$, fica separado pelo seu raio R , pela altura de sua plataforma de apoio na base da estrutura da haste h , e pelo centro de massa da haste que localiza-se na metade dela. Todo o sistema fica sujeito ao campo gravitacional local de aceleração g .

Neste sistema, o braço de trabalho possui distribuição uniforme de massa, um comprimento l em relação ao eixo da junta. Seu centro de massa está localizado na sua metade, e o sistema de transmissão e redução da velocidade do atuador é parte integrante dele.

Reportando-se ao formalismo matemático pré discutido anteriormente, chega-se a equação do balanceamento dos momentos gravitacionais, equação 2.18.

$$G = \left(\frac{M}{2} + F\right) l g \text{sen}(q) + \left(\frac{Ml}{2n^2} + \left(\frac{l}{n} + h + R\right) m\right) g \text{sen}(q + \pi) = 0 \quad (2.18)$$

Suponha que a vida útil dos motores aproxima-se do fim, que o manipulador é destinado a executar uma tarefa mais robusta que anteriormente, neste caso será feita a troca dos motores,

reprojetados para a nova função. Neste caso, os parâmetros massa m e raio R do motor, assumirão respectivamente os novos valores m_2 e R_3 que devem ser maiores que os originais. Assim a equação 2.18, tomaria a forma da equação 2.19, indicando a produção de um desequilíbrio de momento negativo em relação ao eixo de giro, em função do aumento do contrapeso, considerando que o ângulo q seja positivo e menor que π .

$$G = \left(\frac{M}{2} + F\right) l g \text{sen}(q) + \left(\frac{Ml}{2n^2} + \left(\frac{l}{n} + h + R_3\right) m_2\right) g \text{sen}(q + \pi) < 0 \quad (2.19)$$

Assim, pode-se constatar que a simples troca de um motor por um outro com características diferentes, altera os parâmetros do modelo dinâmico. Isto se agrava muito com a mudança do tipo ou configuração geométrica dos acionadores das juntas do manipulador, que implica na mudança não só dos parâmetros, mas também do modelo dinâmico das juntas, veja ilustração na figura 2.8.

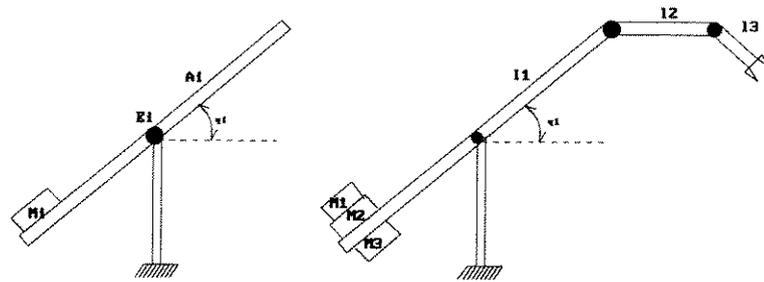


Figura 2.8: Compensação de gravidade por distribuição de massas em robôs.

Outra constatação importante é que a modificação ou a substituição e a realocação em peças de um manipulador deve ser prevista e modelada dentro das especificações do seu projeto. Isto pode ser feito, por exemplo, discriminando-se as coordenadas dos centros de massa, massas, e as inércias, por juntas, e também do sistema isolado do(s) motor(es) contido(s) no elo, independentemente das alterações dos parâmetros ou das configurações dos acionamentos, que é a função do programa AFICESE, mostrado na seção 2.9.

2.8.2 Pré Dimensionamento dos Elos e Motores

Quando um manipulador é construído de forma não muito criteriosa, usando-se materiais preexistentes, aproveitando partes de outros equipamentos compostos de materiais com densidades e resistências diversas e motores inadequados. Este manipulador para funcionar e atender às exigências da função, certamente fica parcial ou totalmente superdimensionado, e portanto com custo mais elevado.

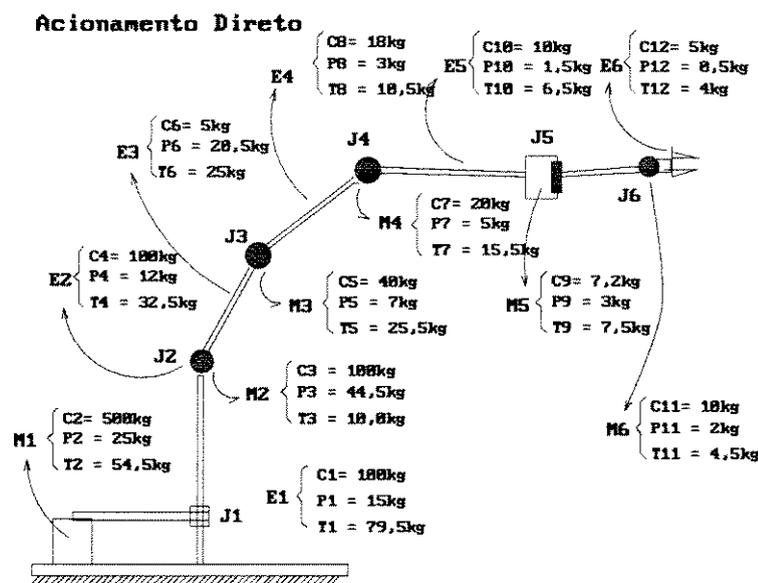


Figura 2.9: Robô construído sem critério de distribuição de massas.

A figura 2.9, mostra um manipulador com acionamento direto, no qual distingue-se para cada grau de liberdade os componentes E_i e M_i , elos e motores. Três aspectos físicos referentes a estes elementos são importantes para a análise; a capacidade máxima do componente suportar outras cargas C_i ; o peso individual do componente P_i , e a carga real que o componente está suportando T_i devido aos fatores de projeto, conforme cada grau de liberdade i .

Seja X_i , o motor ou a estrutura do elo da junta i ; T_i a carga que ele deve suportar, T_{i+1} a carga suportada pelo elemento seguinte na cadeia, e P_{i+1} , o peso do elemento seguinte. Então, a carga total suportada por este componente é dada pela equação 2.20, mas para que ele seja eficiente e capaz, esta carga não deve ser superior em nenhum momento a sua capacidade, isto é imposto pela restrição 2.21.

$$T_i = T_{i+1} + P_{i+1} \tag{2.20}$$

$$C_i \geq T_i \tag{2.21}$$

O elemento escolhido é definido como sendo capaz de suportar o restante da estrutura. Entretanto, não se pode afirmar que eficientemente pois o sistema de acionamento requer energia para executar a tarefa, e também para sustentar a sobrecarga de sua própria estrutura e a dos componentes que sua junta sustenta na presença do campo gravitacional. Fator este que o torna pesado, dificultando e exigindo a sofisticando do seu sistema de controle. Por isto, para que o

sistema global fique otimizado, motores e estruturas devem ser dimensionados durante a fase de projeto, em termos de capacidade e não em termos de alcance ou do volume de trabalho, começando da garra sequencialmente até a base, incluindo-se motores e estrutura, garantindo a realização da tarefa e a economia de consumo de energia, bem como a redução do custo da construção do robô.

Por estas razões, se pode dizer que seria ideal que a capacidade do motor C_i fosse um pouco superior a sua carga total T_i , no ponto de carregamento mais crítico, para que se garanta que este seja acelerado em regime de operação contínua sem ser danificado por sobreaquecimento por passar dos limites de operação contínua ou sobrecarregamento. Isto é muito importante do ponto de vista de construção do modelo de um robô modular, porque pode-se manter uma estrutura robusta, acionada por motores fortes o suficientes para sustentá-la, enquanto a carga imposta pela tarefa for próxima da capacidade especificada, economizando energia, reduzindo o custo, o volume e a massa dos equipamentos.

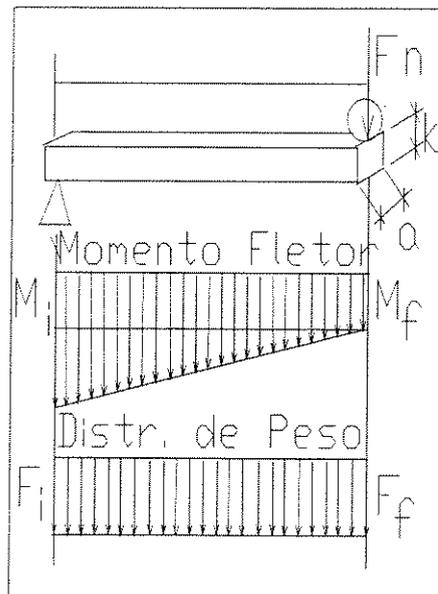


Figura 2.10: Verificação dos parâmetros e perfil de esforços em um elo.

A figura 2.10, mostra o perfil típico de força sobre um elo, na forma de uma barra uniforme suportando uma carga de força F em sua extremidade, e de comprimento l , largura a e altura b , onde as intensidades de forças no começo e final da barra são respectivamente F_i e F_f . Este aspecto é muito importante para quem deseja trabalhar com o dimensionamento de um elo, pois a estrutura de um elo deve ter suas espessuras reduzidas ao máximo desde que não supere a tensão de cisalhamento, lateral, isto deve ser constatado verificando o ponto de máximo esforço, além disto, deve-se tomar cuidado também com a tensão de cisalhamento torcional que quando superada permite a ruptura transversal do elo.

Por outro lado, existe a possibilidade de que os elos se tornem flexíveis com a redução de sua espessura, fazendo com que o sistema deixe de ser holonômico, necessitando-se outras leis

para a determinação do seu modelo dinâmico, Assunto este que não é escopo deste trabalho.

A configuração do sistema de acionamento dos manipuladores pode assumir várias combinações. Duas representações possíveis são apresentadas na figura 2.11, onde M_i , E_i , e J_i representam os motores, elos e juntas respectivamente. A figura 2.11b, mostra a configuração para o acionamento direto de um manipulador, e a figura 2.11a que ilustra uma combinação de acionamento indireto muito semelhante aquele do robô JECA II, cujo modelo cinemático e sua estrutura comentada em termos de determinação dos centros de massas são mostrados em [SILVA, 98d].

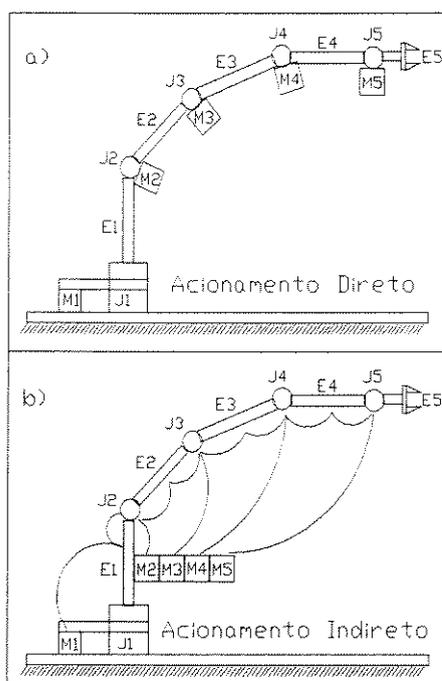


Figura 2.11: Diagrama de Dimensionamento dos Elos e Motores para acionamento, a) Direto b) Indireto.

Isto também nos permite concluir que a substituição de um destes motores, por algum outro diferente, acarretará na alteração significativa dos parâmetros da equação dinâmica do sistema, como massa, posição dos centros de massas, e inércia da junta, geralmente exigindo nova identificação dos parâmetros, e a possível necessidade de desmontagem do elo, dificultando a elaboração de um sistema modular.

Se o sistema de acionamento do manipulador for indireto, o a redimensionamento e substituição dos motores, não atinge as estruturas móveis, logo não influenciam no modelo dinâmico do manipulador. Observando atentamente a estrutura mostrada na figura 2.11, pode-se verificar com clareza que conforme o tipo de acionamento, motor ou acoplador trocado de qualquer que seja o elo, pode causar alterações estruturais nos elos ou no manipulador em geral.

O programa AFICESE, apresentado na seção seguinte, é um programa que tem a função

de agrupar os componentes dos atuadores na estrutura do manipulador, redefinindo os parâmetros dos elos. Para isto, ele conta com os parâmetros estruturais e de orientação das estruturas anteriores dos elos, dos manipuladores e dos motores, que são básicos na redefinição dos parâmetros estruturais atuais dos elos, após as modificações e testes para verificação se os critérios de seleção de atuadores, adotados foram atendidos.

2.9 AFICESE - Algoritmo de Fusão, Integração e Compatibilização Estrutural dos Elos

A seleção e a determinação de atuadores para os manipuladores cria o problema da integração dos motores nos elos o que altera os parâmetros (estruturais) físicos e geométricos destes, tais como massas, centros de massa e momentos de inércia, que conseqüentemente causam as modificações estruturais dos elos, o que produz alterações nos parâmetros do modelo dinâmico, e que por sua vez reincide no processo de seleção de atuadores.

Geralmente quando se busca especificar atuadores para as juntas das cadeias cinemática de manipuladores, não se leva em conta as estruturas dos atuadores que serão incorporados ou fundidos, na estrutura dos elos. AFICESE é um algoritmo que está ilustrado de uma forma genérica na figura 2.12, e seu fluxograma geral e detalhado é ilustrado no anexo A. Ele foi proposto para resolver o problema da integração das estruturas dos atuadores nos elos, recalculando os parâmetros gerais de cada elo em função de diversos atuadores disponíveis, sendo assim muito importante que estes parâmetros cheguem ao algoritmo de modelagem dinâmica num formato padrão ou uniforme, e compatível. O assunto tratado nesta seção é apresentado também em [SILVA, 98g,i,k,m,n].

2.9.0.1 Fusão e Compatibilização dos Parâmetros do Elo

Para a simples modelagem, e para se chegar as equações dinâmicas preliminares de manipuladores no processo de seleção de atuadores, não há nenhuma exigência no sentido de fazer alguma adaptação, ou incorporação de componentes extras na estrutura dos elos para determinar o modelo dinâmico, resolver as equações dinâmicas ou averiguar os esforços solicitados para os atuadores das juntas.

Como na escolha dos atuadores existe a modificação de três parâmetros básicos e importantes na estrutura dos elos com a fusão ou incorporação dos seus componentes no modelo dinâmico, sendo eles, a massa; as coordenadas do centro de massa; e os momentos de inércia dos elos. Há dois caminhos a serem seguidos para a resolução do modelo dinâmico considerando estas variações: o primeiro evidencia cada parâmetro no equacionamento algébrico e gera uma equação complexa com o aparecimento de centenas de parâmetros que aparecem múltiplas vezes no seu corpo, se tornando de difícil resolução e simplificação, devido primeiramente a requisição elevada de operações matemáticas e memórias; o segundo caminho gera múltiplas resoluções do modelo

dinâmico, precedidas de adaptações, que são a incorporação ou a fusão dos atuadores ao elo e a compatibilização algébrica dos parâmetros dos elo, executadas a cada vez que se escolhe um atuador para cada junta, sempre partindo da garra para a base.

O segundo caminho faz com que a resolução do equacionamento dinâmico aconteça em harmonia com o processo de escolha de atuadores. A fusão dos parâmetros estruturais é descrita de forma genérica pelo diagrama funcional proposto na figura 2.12, e visa corrigir essencialmente a massa, as coordenadas dos centro de massa e também os momentos de inércia em torno do centro de massa referida ao sistema de coordenadas do elo analisado.

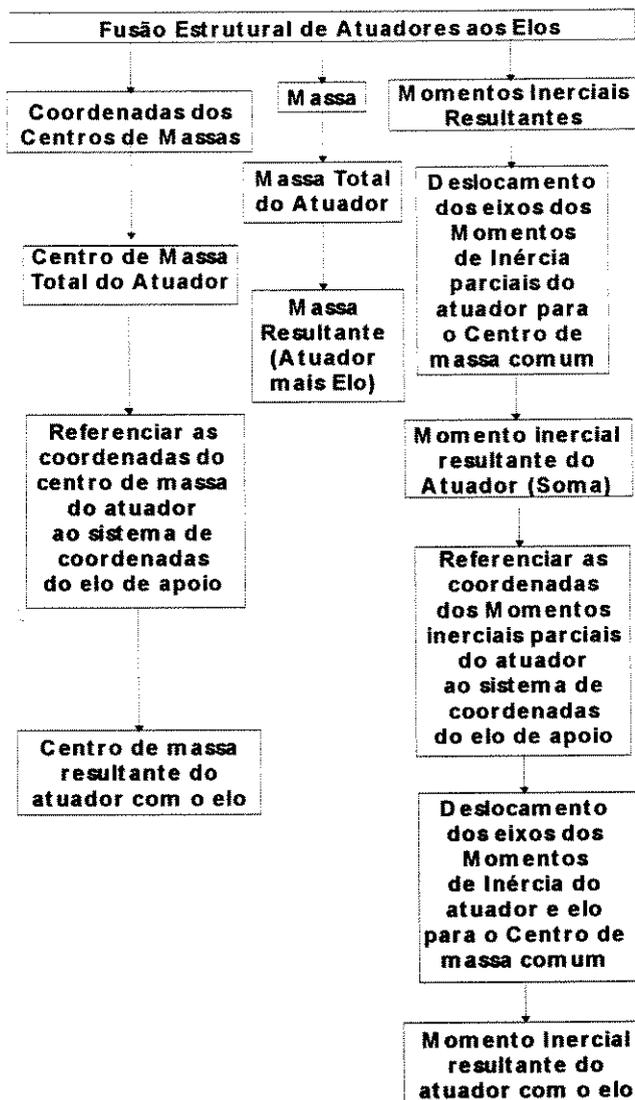


Figura 2.12: Diagrama funcional do AFICESE.

Já a compatibilização deve garantir que os parâmetros, massa M ; momentos de inércia J ; e coordenadas dos centros de massa C_m dos elos de um manipulador de n graus de liberdade se encontram no formato indicado pelas equações 2.22, 2.23 e 2.24.

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & M_1 & \dots & M_n \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$J = \begin{bmatrix} J_{1x} & J_{1y} & J_{1z} \\ J_{2x} & J_{2y} & J_{2z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ J_{nx} & J_{ny} & J_{nz} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$Cm = \begin{bmatrix} Cm_{1x} & Cm_{1y} & Cm_{1z} \\ Cm_{2x} & Cm_{2y} & Cm_{2z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Cm_{nx} & Cm_{ny} & Cm_{nz} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Assim cada componente do sistema de acionamento de cada junta deve ser incorporado, um a um, em cada elo em que se apoia, até ser concluído o processo de fusão dos parâmetros. Genericamente isso pode ser representado no plano como ilustrado na figura 2.13, onde distingue-se duas etapas, uma que especifica a fusão de atuadores estruturalmente compostos, como o motor dividido em rotor (quadrado) e estator (pentaedro), e outra para a fusão do componente atuador, composto ou não (elipse) a um elo genérico (retângulo grande).

Em geral, predomina a incorporação individual e direta de cada componente de cada atuador de uma junta em cada elo, mas quando se trata do caso de acionamento indireto, a incorporação do motor ao elo é precedida pela fusão de seus dois componentes, rotor e estator, discriminados na catalogação. Quando os atuadores estão apoiados na base do manipulador é dispensável a fusão, pois, por serem estacionários em relação ao sistema de coordenadas inerciais dos elos, não influem no modelo dinâmico que estruturalmente é influenciado exclusivamente pelas partes móveis do manipulador, (os elos, a garra e pela carga ou tarefa). Nas respostas dinâmicas preliminares de manipuladores no processo de seleção de atuadores, não há nenhuma exigência no sentido de fazer alguma adaptação ou incorporação de componentes extras na estrutura dos elos para determinar o modelo dinâmico, resolver as equações dinâmicas ou fazer a averiguação dos esforços solicitados para os atuadores das juntas.

O AFICESE é um algoritmo construído usando o aplicativo MATHEMATICATM, que realiza operações espaciais de incorporação dos atuadores nos elos de um manipulador. A figura 2.13, que será explicada abaixo, ilustra a incorporação dos atuadores ou das partes deles num elo planar, ocorridas durante o processo de seleção destes atuadores.

A visualização dos manipuladores planares é mais simples. Por isto empregou-se um elo planar para explicar o problema da fusão dos atuadores, facilitando a visualização das operações vetoriais, sem que haja perda de generalidade com relação à forma de tratamento matemático.

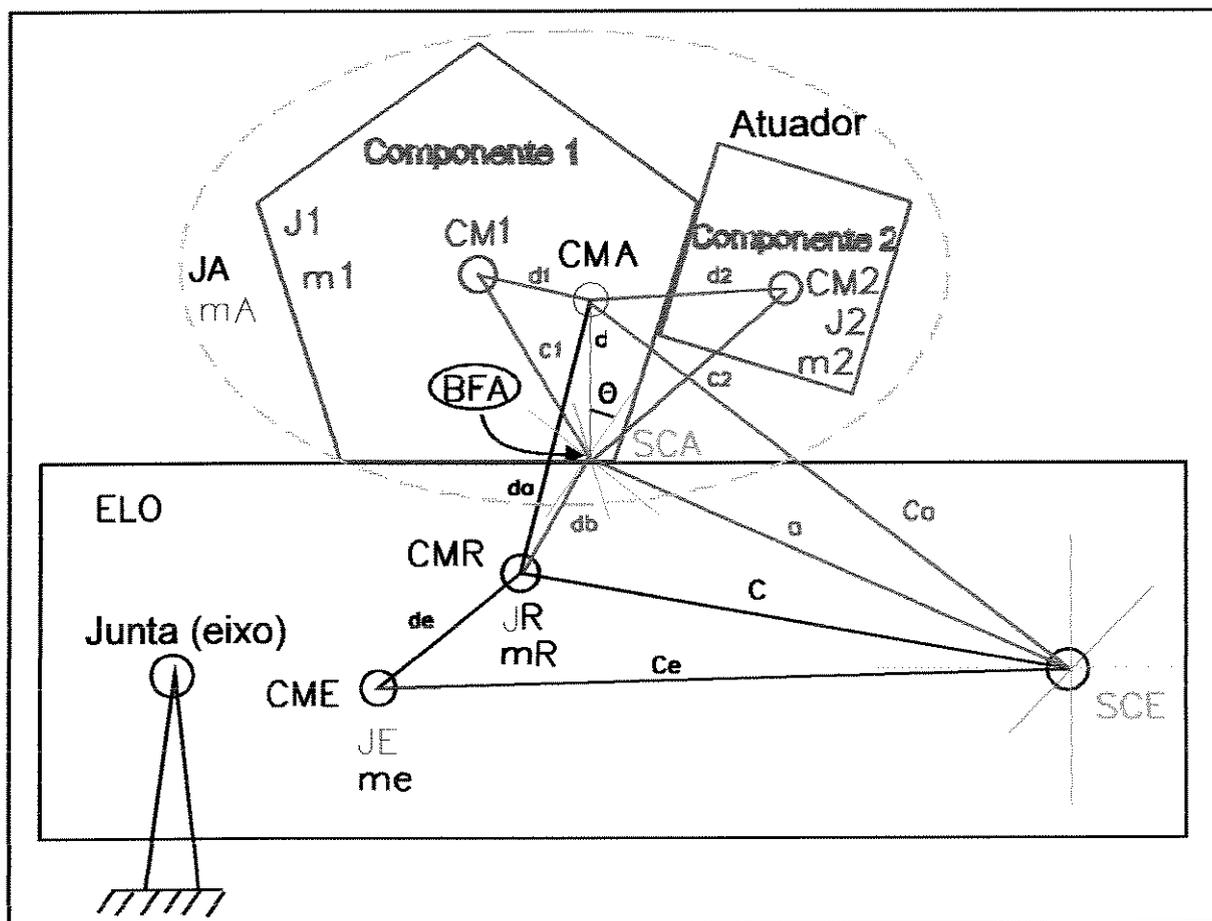


Figura 2.13: Visualização da incorporação geométrica de atuadores num elo

Para melhores esclarecimentos veja a lista abaixo dos símbolos mostrados na figura 2.13 com seus respectivos significados, onde o atuador ou a carga, por exemplo, seria composto de dois componentes, $Atuador = Componente1 + Componente2$, por exemplo ($motor = rotor + estator$), e SCA é considerado coincidente com SCA_1 e SCA_2 .

A recomposição dos parâmetros do elo é feita através da contribuição de três tipos de componentes, o **motor** que anteriormente deve ser recomposto de seus dois componentes o rotor e o estator, o **os redutores ou transmissões**, e finalmente a **carga**, que são considerados como um corpo único.

2.9.1 Recomposição da Massa da Estrutura do Elo

No AFICESE, quando são inseridos componentes de acionamento ao elo, o cálculo da massa após a inserção final do elo, é obtido genericamente pela soma algébrica da massa do elo m_e com a massa individual m de cada componentes, ou seja, $m_e = m_e + m$ como ilustrado na coluna central do diagrama da figura 2.12.

Quando o acionamento é indireto, durante a inserção do motor, esta soma é precedida pela recomposição da massa total do motor $m = m_1 + m_2$, (a soma das massas do rotor m_1 e do estator m_2). Já as massas de redutores e transmissores que porventura existirem, ou a massa dos rotores e dos estatores dos casos de acionamentos do tipo direto, são incorporadas diretamente de forma genérica, um por um, como descrito no parágrafo anterior.

O cálculo das massas dos componentes do sistema de acionamento não influem no modelo dinâmico deste manipulador, e é desnecessário quando as massas dos atuadores são incorporadas na base de um robô rígido fixado na terra, considerando evidentemente que o sistema de coordenadas referencial também seja fixado nela.

2.9.2 Recomposição do Centro de Massa do Elo

A determinação do centro de massa na recomposição dos parâmetros do elo durante a inclusão de componentes dos atuadores nos processos de seleção do sistema de acionamento, é executada através do programa AFICESE, e é representada pela coluna da esquerda do diagrama da figura 2.12. Analiticamente, o centro de massa é estabelecido pelo conhecimento de que o sistema é holonômico e conservativo, mantendo o momento em relação ao sistema de coordenadas do elo, logo, o produto da massa pelo centro de massa atual, é dado pela somatória do produto das coordenadas dos centros de massa das partes, cm_1 , cm_2 ou $CME = (x_e, y_e, z_e)$, pelas suas respectivas massas m_1 , m_2 e m_e . Assim pode-se concluir que o centro de massa da recomposição é dado pelas equações 2.25 e 2.26, quando o atuador for, respectivamente, composto ou simples, veja [HALIDAY, 70] e [STIOPIN 68].

$$CMR = \frac{m_e.CME + m_1.cm_1 + m_2.cm_2}{m_e + m_1 + m_2} \quad (2.25)$$

$$CMR = \frac{m_e.CME + m_1.cm_1}{m_e + m_1} \quad (2.26)$$

No programa AFICESE a orientação do sistema de coordenadas do motor não é a mesma do elo, como está ilustrado na figura 2.14 em que pelo menos um dos eixos dos sistemas de coordenadas fica alinhado com o eixo Z_m do motor, se o atuador tiver nome "motor", como dito anteriormente, ele é um componente composto que requer o cálculo do centro de massa do conjunto estator/motor, para o qual SCA , SCA_1 e SCA_2 são coincidentes, logo o novo centro de massa pode ser encontrado por expressões do tipo mostrado abaixo para o espaço.

$$CMR = \frac{m_e.CME + m.C_a}{m_e + m} \quad (2.27)$$

onde $C_a = d(\theta) + a$

$$d(\theta) = \frac{m_1.C_1 + m_2.C_2}{m_1 + m_2},$$

Se o SCA tiver pelo menos um eixo paralelo com um dos eixos do SCE, todos os dois demais eixos do SCA estarão desalinhados e girados (em torno dos dois eixos dos dois sistemas de coordenadas que estão alinhados na mesma direção) de um ângulo $\theta = \alpha \pm +k.\pi$ (onde k é um número inteiro e α um real qualquer) em relação aos outros eixos do SCE. Se isto acontecer, fica fácil a representação dos elementos do SCA no SCE, que é resolvida com a projeção destes elementos no SCE em função do ângulo θ que generaliza os valores referidos do SCA ao SCE, permitindo a recomposição do elo com a inserção do atuador.

Na prática isto deve acontecer naturalmente porque os eixos das juntas dos elos geralmente estão alinhados ou são ortogonais aos eixos dos atuadores, que coincidem respectivamente com os eixos z dos seus respectivos sistemas de coordenadas.

Por simplicidade e para facilitar a exemplificação do problema, neste trabalho foi utilizado somente as seis condições ilustradas pela figura 2.14, embora haja possibilidade para a entrada de dados genéricos através do programa AFICESE. Desta forma, pela utilização das seis condições padrão, foi encontrado que:

$$C_a = (x_a, y_a, z_a) \quad (2.28)$$

$$C_1 = (c_{x_r}, c_{y_r}, c_{z_r}) \quad (2.29)$$

$$C_2 = (c_{x_e}, c_{y_e}, c_{z_e}) \quad (2.30)$$

O Motor compõe-se de estator e rotor e suas coordenadas são determinadas em função dos seus próprios parâmetros.

$$x_a = \frac{c_{x_e} \cdot m_e + c_{x_r} \cdot m_r}{m_e + m_r} \quad (2.31)$$

$$y_a = \frac{c_{y_e} \cdot m_e + c_{y_r} \cdot m_r}{m_e + m_r} \quad (2.32)$$

$$z_a = \frac{c_{z_e} \cdot m_e + c_{z_r} \cdot m_r}{m_e + m_r} \quad (2.33)$$

Para o redutor, rotor e estator isolados, $d = C_1$. Referenciando o centro de massa ca dos atuadores do SCA para o SCE os centros de massa passam serem representados por C_a , que para cada uma das figuras 2.14a 2.14b, 2.14c, 2.14d, 2.14e e 2.14f valem respectivamente:

$$(a), C_a = \begin{bmatrix} x_a \sin(\theta) - y_a \cos(\theta) \\ z_a \\ x_a \cos(\theta) - y_a \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$(b), C_a = \begin{bmatrix} x_a \cos(\theta) - y_a \sin(\theta) \\ z_a \\ x_a \sin(\theta) + y_a \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$(c), C_a = \begin{bmatrix} x_a \cos(\theta) - y_a \sin(\theta) \\ x_a \sin(\theta) + y_a \cos(\theta) \\ z_a \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$(d), C_a = \begin{bmatrix} x_a \sin(\theta) + y_a \cos(\theta) \\ x_a \cos(\theta) - y_a \sin(\theta) \\ z_a \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$(e), C_a = \begin{bmatrix} z_a \\ x_a \cos(\theta) - y_a \sin(\theta) \\ x_a \sin(\theta) + y_a \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$(f), C_a = \begin{bmatrix} z_a \\ x_a \cos(\theta) - y_a \sin(\theta) \\ x_a \sin(\theta) - y_a \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Agora que os centros de massa dos atuadores de uma forma geral estão determinados em relação ao SCE, basta aplicar o princípio da recomposição do centro de massa de cada elo,

$$CMR = \frac{m_e \cdot CME + m \cdot C_a}{m_e + m} = (C_{e_x}, C_{e_y}, C_{e_z}) \quad (2.40)$$

$$\text{ou } CMR = \begin{bmatrix} \frac{m_e \cdot CME_x + m \cdot C_{a_x}}{m_e + m} \\ \frac{m_e \cdot CME_y + m \cdot C_{a_y}}{m_e + m} \\ \frac{m_e \cdot CME_z + m \cdot C_{a_z}}{m_e + m} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

2.9.3 Recomposição do Momento de Inércia do Elo

No programa AFICESE, quando o acionamentos é do tipo indireto, a determinação do momento de inércia do motor ao ser incorporado ao elo de apoio mecânico, é precedida pela associação do rotor (componente 1) e do estator (componente 2), conforme figura 2.13. Neste caso o motor ou seus dois componentes possuem sistema de coordenadas coincidentes, SCA , SCA_1 e SCA_2 centrados na base do motor, como indica a figura 2.15.

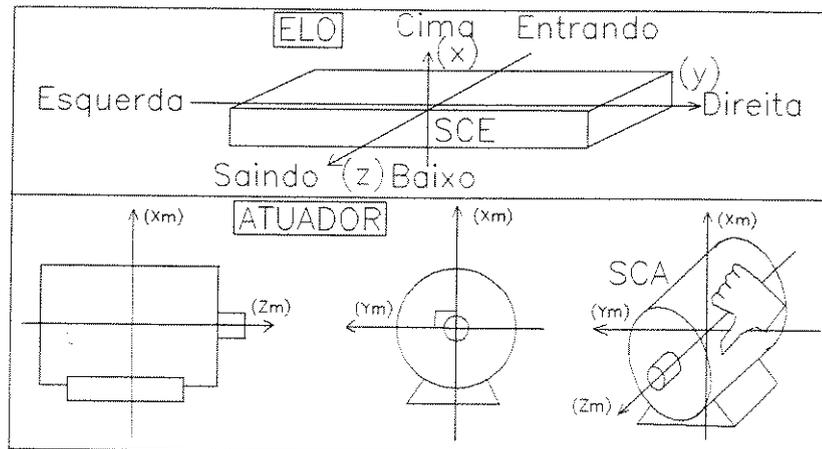


Figura 2.15: Regra geral para a determinação do sistema de coordenadas de um atuador.

Para a incorporação de um componente num determinado elo, o momento de inércia do atuador é determinado em relação ao seu centro de massas, e deve ser calculado em relação ao eixo do elo. Por esta razão, o eixo em torno do qual os momentos de inércia do atuador foram determinados, deve ser reorientado na direção dos eixos do sistema de coordenadas do elo através do teorema da reorientação do eixo inercial, ou da **teorema da variação do momento de inércia devido à reorientação do eixo** veja [STIOPIN, 68], e depois deslocado usando-se o **teorema dos eixos paralelos** como apresentados por [HALLIDAY, 70] e [STIOPIN, 68], onde o momento de inércia $J = J_o + M \cdot d^2$ para o novo eixo cujo deslocamento sofrido foi igual a d , é determinado pela soma do momento inercial do eixo de origem J_o ao produto da massa M pelo quadrado do deslocamento do eixo d^2 .

As inércias determinadas para as partes do motor (rotor e estator), são medidas em relação a eixos paralelos aos eixos dos seus respectivos sistemas de coordenadas SC1 e SC2, que devem ser coincidentes com SCA do motor, localizados nos centros de massa do rotor e estator, e que devem se deslocar para o centro de massa comum. A soma deles determina os novos momentos inerciais chamados de J_A . Isto é feito da mesma forma para as demais condições, ou seja rotor e estator isolados, e redutor.

$$J_A = (J_1 + m_1 \cdot (d_1)^2) + (J_2 + m_2 \cdot (d_2)^2) \quad (2.42)$$

Para o caso dos atuadores não serem compostos, os momentos inerciais J_A assumem diretamente os valores de catálogos sem a necessidade de recalculá-los.

Uma vez estabelecido o momento de inércia dos atuadores referidos ao SCA, para relacioná-lo ao elo necessita-se referenciá-lo ao SCE. Sabendo-se que o SCE possui uma outra orientação, como definido anteriormente, necessita-se a aplicação do **teorema da variação do momento de inércia devido à reorientação do eixo**, apresentado por [STIOPIN, 68].

Aplicando este teorema aos modelos de organização de atuadores das figuras 2.14a, 2.14b, 2.14c, 2.14d, 2.14e e 2.14f chega-se aos respectivos valores para os momentos de inércia J_A do atuador referido ao SCE, sendo que para as condições da figura $j_{xy} = 0$, $a = \cos(\theta)$, $b = \sin(\theta)$, $c = a^2$, e $d = b^2$.

$$(a), J_{A_e} = \begin{bmatrix} J_x \cdot b + J_y \cdot a + 2 \cdot J_{xy} \cdot c \cdot d \\ J_z \\ J_x \cdot a + J_y \cdot b + 2 \cdot J_{xy} \cdot c \cdot d \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$(b), J_{A_e} = \begin{bmatrix} J_x \cdot a + J_y \cdot b + 2 \cdot J_{xy} \cdot c \cdot d \\ J_z \\ J_x \cdot b - J_y \cdot a + 2 \cdot J_{xy} \cdot c \cdot d \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

$$(c), J_{A_e} = \begin{bmatrix} J_x \cdot a + J_y \cdot b + 2 \cdot J_{xy} \cdot c \cdot d \\ J_x \cdot b - J_y \cdot a + 2 \cdot J_{xy} \cdot c \cdot d \\ J_z \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

$$(d), J_{A_e} = \begin{bmatrix} J_x \cdot b - J_y \cdot a + 2 \cdot J_{xy} \cdot c \cdot d \\ J_x \cdot a + J_y \cdot b + 2 \cdot J_{xy} \cdot c \cdot d \\ J_z \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

$$(e), J_{A_e} = \begin{bmatrix} J_z \\ J_x \cdot a + J_y \cdot b + 2 \cdot J_{xy} \cdot c \cdot d \\ J_x \cdot b - J_y \cdot a + 2 \cdot J_{xy} \cdot c \cdot d \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

$$(f), J_{A_e} = \begin{bmatrix} J_z \\ J_x \cdot a + J_y \cdot b + 2 \cdot J_{xy} \cdot c \cdot d \\ J_x \cdot b - J_y \cdot a + 2 \cdot J_{xy} \cdot c \cdot d \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Uma vez obtido o momento de inércia do atuador J_{A_e} referido ao SCE , basta reaplicar o teorema dos eixos paralelos para os momentos de inércia deste atuador J_A , e do elo isolado J_E , em relação aos eixos centrados no centro de massa resultante CMR , e paralelos ao SCE , deslocados respectivamente de d_a e d_e .

$$J_d = J_{A_e} + m_A \cdot (d_a)^2$$

$$JJ_e = J_E + m_e \cdot (d_e)^2$$

Assim, os momentos inerciais resultantes J_R são determinados pela soma dos momentos de inércia do atuador J_d e do elo JJ_e em relação ao centro de massa resultante CMR , veja a equação 2.49.

$$J_R = J_d + JJ_e = J_E + J_{A_e} + m_e \cdot (d_e)^2 + m_A \cdot (d_a)^2 \quad (2.49)$$

2.9.3.1 Influência do Deslocamento do Centro de Massa de um Elo num Manipulador Espacial

A ilustração da figura 2.13 mostra uma junta no plano, sua função é somente facilitar a visualização da forma de expressar matematicamente os passos do cálculo dos parâmetros geométricos, que são semelhantes no plano e no espaço. Quando se quer determinar o momento de inércia de um elo girando em torno do eixo de rotação de uma junta isoladamente, basta conhecer as massas acionadas e a menor distância entre o centro de massa e o eixo de rotação da junta.. Mas quando trabalha-se com sistemas complexos no espaço como um manipulador espacial, supondo que os eixos x e y do sistema de coordenadas do elo definem um plano ortogonal ao eixo da junta acionada, é importante representar também a coordenada do centro de massa ao longo do eixo z , pois ela influencia na determinação exata do momento de inércia das demais juntas. Assim também é importante considerar os tensores dos momentos de inércia em torno dos demais eixos do sistema de coordenadas.

A figura 2.16, visa ilustrar isto. Supondo que somente no eixo do elo $l3$ seja movimentado, a configuração da cadeia cinemática da ilustração 2.16a gira de um ângulo q como representado na figura 2.16c. Isto não causaria uma modificação do momento da inércia desta junta, porque não houve modificação da posição do seu centro de massa em relação ao eixo da própria junta. Mas pode-se constatar, pelos diagramas da vista superior destas duas configurações, como ilustrado respectivamente nas figuras 2.16b e 2.16d, que a movimentação sofrida, desloca o centro de massa do elo 3 que se aproxima do eixo da primeira junta do elo $l1$, com isto, a influência do momento de inércia do elo $l3$ reduz-se na junta do elo $l1$. Logo, pode-se ver que que é importante tomar cuidado

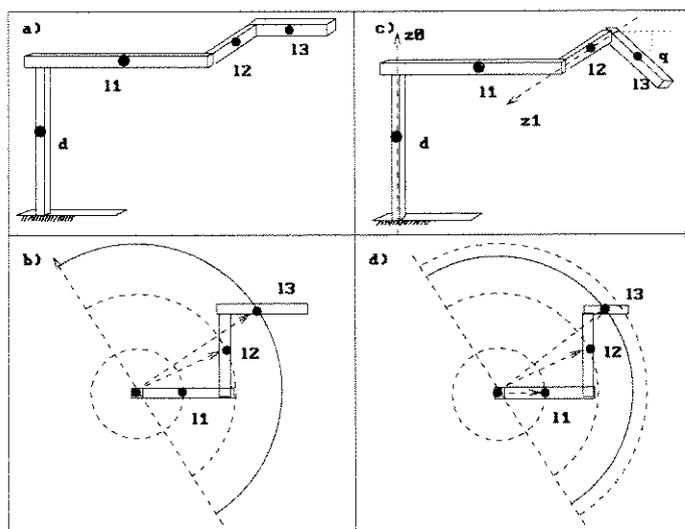


Figura 2.16: Representação do efeito do deslocamento do centro de massa

com esta representação quando trabalha-se no espaço, e que é relevante a representação exata das coordenadas espaciais.

2.9.4 Regra de Estabelecimento dos Parâmetros de Redutores e Transmissões

No AFICESE, não foram levadas em considerações as dimensões físicas e geométricas dos redutores e transmissões, por isto se estabeleceu uma regra para representar estes parâmetros na estrutura do elo, de tal forma que tenham efeito diferencial não dominador no cálculo de restituição dinâmica dos elos durante o processo de incorporação dos atuadores no corpo do elo. Neste sentido a massa da transmissão e/ou redutor é determinada pela multiplicação da massa do redutor (poderia ser determinado também em função da massa do motor) por uma constante k que é a relação entre a massa da transmissão e a massa do redutor no catálogo, e que é função da distância relativa (quantidade de graus de elos) entre o elo de apoio do motor e a junta acionada por ele.

Para os modelos estudados e simulados (manipulador de 3 graus de liberdade), estabeleceu-se que o redutor deve se encontrar apoiado no mesmo elo que apoia o motor e que tem massa, momento de inércia e centro de massa encontrados no catálogo de redutores, neste caso $k = 1$. se ele estiver apoiado no elo imediatamente posterior ao motor, então $k = 0.4$ e é chamado de transmissão. Se estiver apoiado dois graus de liberdade após o motor, então $k = 0.2$, o que equivale as suas massas serem consideradas respectivamente 100%, 40% e 20% da massa do redutor.

Esta regra deve ser adotada para os demais parâmetros físicos e geométricos, inclusive para a computação do custo total do acionamento e para a determinação do volume e da massa

resultante em cada elo.

2.10 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo adotou formulação de Euler-Lagrange ([SPONG, 89]), na elaboração do gerador de equações dinâmicas algébricas implantado através do programa AMODIRO, o qual foi empregado na programação para a determinação de modelos dinâmicos do manipuladores, sendo de fundamental importância no processo de seleção de atuadores que foi integrado a modelagem dinâmica de manipuladores industriais, o que será completado no próximo capítulo. A avaliação deste programa, foi feita pela comparação do modelo e das respostas dos parâmetros do manipulador planar de 3-GDL descrito em [LATRE 88] e [LATRE 89] com o modelo e as respostas obtidos através deste programa para aquele mesmo modelo, (veja semelhanças na seção 4.2).

Foi apresentado aqui uma sugestão de correção para o problema das necessidades de adaptação dos atuadores, que surge com o processo de seleção, uma vez que a inserção de seus parâmetros modifica os parâmetros da cadeia cinemática do manipulador, alterando a configuração dos seus parâmetros geométricos como centros de massas, momentos de inércias e massas dos elos, que entram na determinação da resposta dinâmica das juntas, sendo importante para a determinação dos esforços e condições térmicas de operação dos atuadores. Este programa, ou rotina, chamado AFICESE, tem a função de fundir os parâmetros dos atuadores e seus acessórios na estrutura dos elos, conforme vão sendo determinados para cada elo do manipulador, da garra para a base, e coloca os parâmetros geométricos no formato compatível com as equações dinâmicas, com o auxílio do aplicativo MATHEMATICATM usado na elaboração deste programa.

Esta modelagem foi proposta para facilitar as adaptações e modificações inerentes da dinâmica do processo de seleção de atuadores, sendo sensível a diversos fatores tais como: modificações na carga; alterações no trajeto da garra; tipo da cadeia cinemática empregada; parâmetros dos elos; distribuição dos atuadores na estrutura dos elos; tipo de acionamento adotado para cada junta; compensação dos torques de gravidade; tipos de juntas do manipulador, localização dos centros de massa; formato da tarefa ou percurso da garra e muitos outros. Isto permite que se mostre o quanto o processo de seleção de atuadores é sensível a estes fatores.

Finalmente, neste capítulo é dado também uma noção da forma de modelar e proporcionar a compensação dos desequilíbrios da distribuição das massas em torno dos eixos das juntas, proporcionando formas de compensar total ou parcialmente os torques gravitacionais em torno destes eixos.

.

.

Capítulo 3:

Análise dos Critérios de Seleção de Atuadores para Manipuladores

3.1 Introdução

Este capítulo visa apresentar as técnicas de análises e simulação e seleção de atuadores, concentrando-se nos motores de corrente contínua, direcionadas para juntas de manipuladores industriais, abordando os tipos de acionamento, com acoplamento reduzido ou não, e sem acoplamento. A compreensão e/ou conhecimento dos símbolos e dos termos técnicos mais empregados nele, podem ser auxiliados pela recorrência da simbologia e glossário inseridos respectivamente no início e final desta tese.

Este capítulo conterà duas seções principais relacionadas ao estudo da seleção de atuadores: uma delas dedicada a escolha de atuadores para juntas acionadas com acopladores reduzidos, e outra dedicada a escolha de atuadores para juntas acionadas indiretamente através de acopladores sem redução (transmissão simples) e juntas acionadas diretamente.

A seguir será apresentada uma seção contendo uma breve recapitulação da modelagem das juntas, que é elaborada tendo como base o conteúdo da seção 1 de [SILVA, 98o].

Ainda neste capítulo, também será apresentada uma síntese dos tipos, classes e tendências de **atuadores comerciais**, e em desenvolvimento que é complementado pela seção 1 de [SILVA, 98a], que relaciona uma vasta bibliografia sobre o assunto, e da seção 2 de [SILVA, 98a], que mostra alguns tipos de **acopladores** e os seus princípios de funcionamento.

3.2 Classificação, Tendências e Tipos de Atuadores Primários

O atuador primário é o dispositivo do tipo conversor, seja ele servo-válvula, relê, servomotor, de ação rotacional ou linear, associado ou não a um transmissor ou redutor, que transforma

uma fonte de energia recebida do tipo térmica; mecânica; hidráulica; pneumática; química ou elétrica em energia mecânica, regido por uma lei de controle.

A importância dos atuadores, no desenvolvimento de projeto de robôs, está relacionada com a confiabilidade, segurança de operação, economia operacional, redução de volume de trabalho resultado da compactação do atuador que por sua vez permitiria o uso de um elo mais simples, leves, delgados, exigindo menores esforços dos atuadores.

Atualmente tem surgido dispositivos alternativos, muitos deles derivados dos atuadores tradicionais acrescidos de melhoramentos. Os motores elétricos, servoatuadores hidráulicos e eletropneumáticos [VUKOBRATOVICK 89], e [PU 92], estão disponíveis no mercado tanto para uso em corrente contínua, quanto para corrente alternada, associados ainda a estas novas técnicas, entre elas, a comutação eletrônica; relutância variável; controle baseado em cálculo vetorial; além do uso de novos materiais produzidos pela física moderna, tais como os metais de terras raras, samário-cobalto e neódmio-ferro-boro podem armazenar mais energia melhorando o desempenho.

A figura 3.1, sugere um diagrama das linhas de viabilidade de produção de motores em laboratório, ou comercialmente existente no mercado, baseado nos princípios de utilização de energia para operação destes motores, levando em conta: fenômenos físicos e químicos como supercondutividade, ultra-som, vide [AOYAGY, 91], propriedades fotomecânicas, mecanoquímicas, líquido-magnéticas, eletroviscosas e efeitos eletrostáticos, piezoelétricos e térmicos como apresentado pelas propriedades das ligas com memória, expansão térmica, e com características bimetálicas.

As subdivisões apresentadas pelos atuadores piezoelétricos e eletrostáticos indicados na figura 3.1, são reforçadas por [TAKAMORI 91] e [SAKATA 91].

Outra variação apresentada pelos motores eletromagnéticos é que eles podem ser separados pela forma de alimentação, que poderá ser por corrente contínua ou alternada. Os motores de corrente contínua se subdividem em convencionais (com escovas), sem escovas por comutação eletrônica ou de passo, [ANDRADE 88], [ANDRADE 87] e [PAIVA 88]. O último desses se subdivide em motores de passo de relutância variável, motores de passo a ímã permanente e motores de passo híbridos. Já os motores de corrente alternada podem ser divididos em motores síncronos e de indução.

Os atuadores hidráulicos tradicionais, podem também ser subdivididos em três grupos: engrenagens, palhetas e pistões onde cada um é mais apropriado que o outro para realizar tarefas específicas [FRANCO 87]. Este último apresenta três subdivisões: atuadores de pistões em linha com deslocamento variável; atuadores de pistões em linha com deslocamento fixo, e atuadores de pistões inclinados.

Os servotatuadores podem ser subdivididos conforme a forma de ação e a maneira na qual são conectados à carga, em motores rotacionais e prismáticos, veja figura 3.2. Os atuadores rotacionais podem ser **cilíndricos** quando agem de forma torcional em torno do seu eixo, ou **esféricos** que se subdividem em duas classes, a dos atuadores tipo **esféricos posicionadores**, veja [BEDESON 93], [BEDESON 94], [NETO 92], cuja ação ocorre exclusivamente em torno de um ponto, ou do

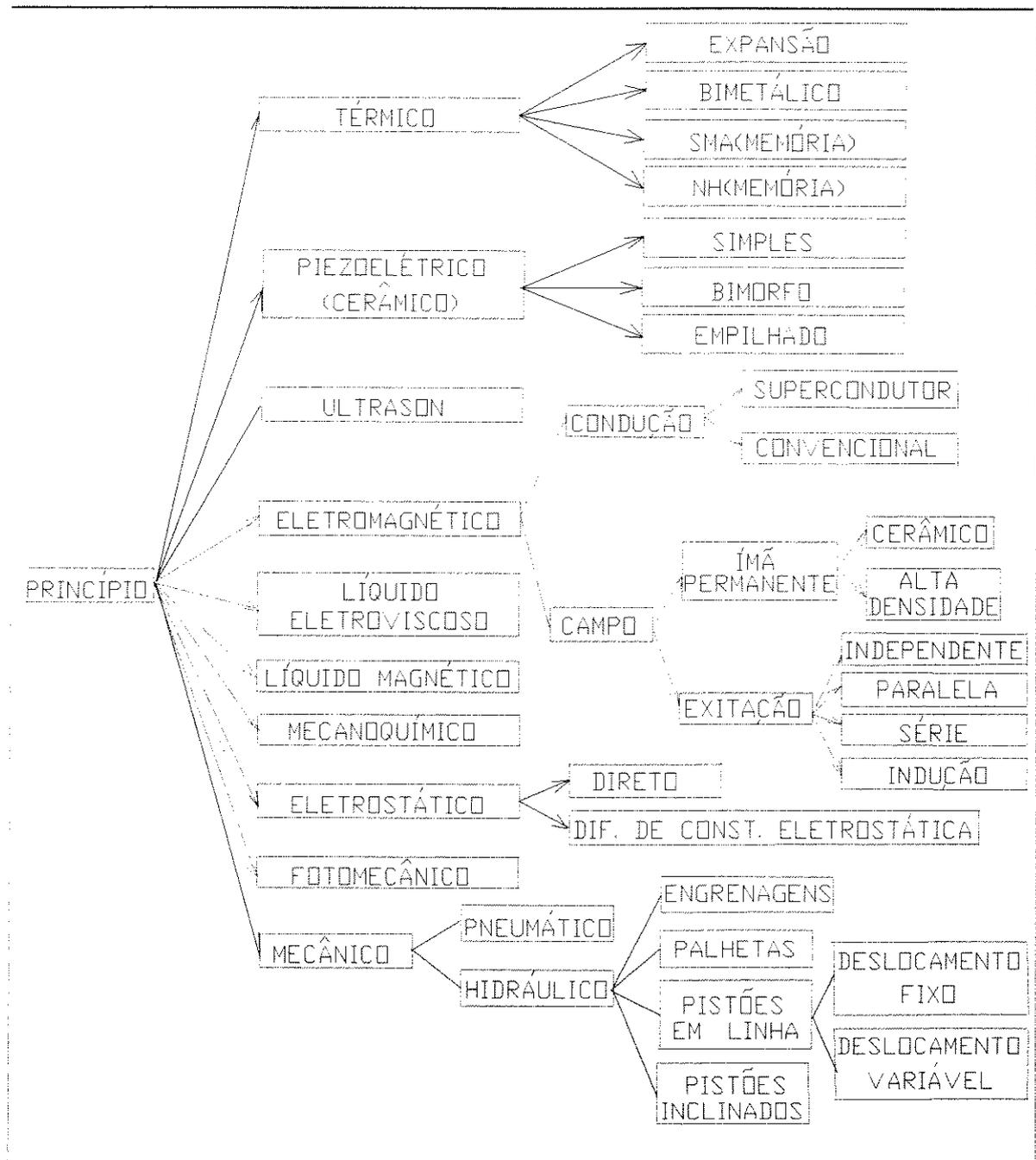


Figura 3.1: Classificação de motores por princípio de funcionamento ou fonte de energia

tipo **esféricos motoposicionadores** veja [VACHEVANOS, 87], [LEE, 88], [KANEKO 89], e [LEE 91] que além do comportamento descrito no tipo anterior, permitem um movimento torcional em torno de um eixo específico, ou da linha que liga a carga ao seu centro.

Os atuadores do tipo **prismáticos** podem por sua vez serem subdivididos em um grupo de atuadores de ação **linear**, portanto unidirecional, e outra de atuadores **planares ou cúbicos**, que agem no plano ou no espaço cartesiano, como acontece tipicamente com as associações de cubos de cristais piezoelétricos, [KURODA 91].

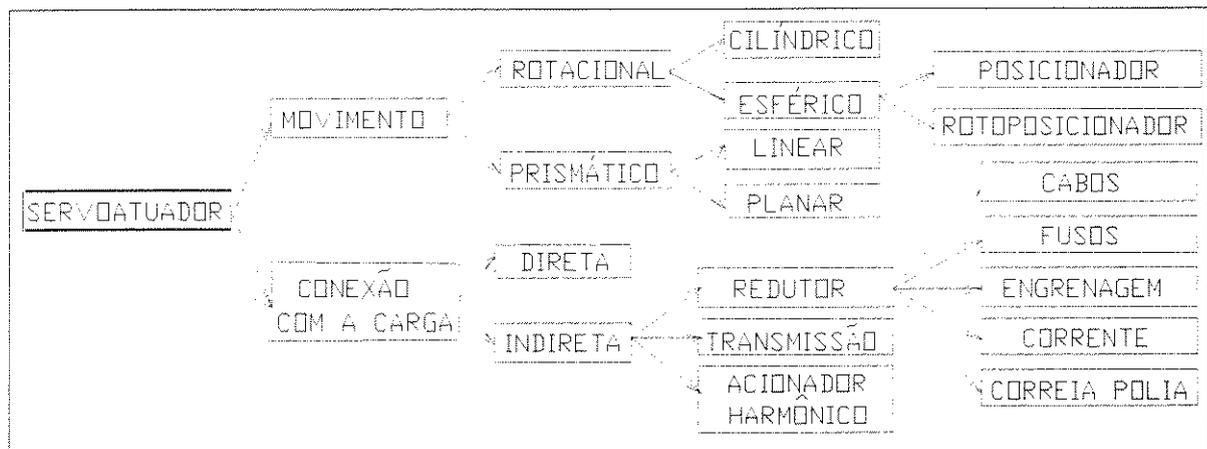


Figura 3.2: Classificação do motor por tipo de acoplamento.

Mais detalhes sobre os tipos de atuadores a serem utilizados num manipulador, e uma extensa lista de referências bibliográfica se encontra da seção 1 de [SILVA, 98a]. A partir daqui este estudo concentrará na definição de alguns dos mais importantes critérios do processo de seleção de motores elétricos de corrente contínua acionados direta e indiretamente, para aplicação em juntas de manipuladores industriais. Isto será precedido através de uma análise do modelo dinâmico dos motores e de uma junta robótica típica.

3.3 Modelagem de uma Junta Robótica Isolada

Uma **junta** robótica geralmente é composta de um motor acoplado a uma carga. No caso do acionamento indireto existirá um um redutor de velocidade ou algum dispositivo para amplificação de torque. Entretanto a **carga** será composta de um elo, que é a carga a ser acionada, mais a carga própria elo, o resto da cadeia do manipulador que é sustentada por ele, e adicionada ainda a carga do manipulador que também é refletida nesta junta, [SILVA, 98c].

3.3.1 Os Modelos do Motor

O motor poderia ser acionado por diversos princípios, conforme o projeto do manipulador [SILVA, 98a]. Por exemplo, um manipulador convencional com um motor eletromagnético do tipo corrente contínua, pode atender com facilidade as exigências de um determinado projeto.

Com o objetivo de especificar o motor para acionar a junta, é importante conhecer o torque eletromagnético deste motor que é responsável por todo o consumo de energia do mesmo, incluindo perdas e acionamento da carga. O torque eletromagnético é dado pelo produto da constante de torque determinada em laboratório e pode ser obtida em catálogos função da corrente de armadura que depende da carga acionada. Isto indica que o torque eletromagnético pode ser monitorado pela leitura da corrente que determina o seu perfil.

$$T_m(t) = ki(t) \quad (3.1)$$

3.3.1.1 Os Modelos de Motor sem Carga

Quando o motor funciona sem carga, pode-se escrever sua expressão diferencial de torque motor, conforme mostra as equações 3.2 para motor comercial, e 3.4 para motor ideal (onde os atritos são desprezados). Para compensar o efeito de o atrito do motor que foi desprezado, o valor do torque total do motor foi aumentado em aproximadamente 4% , porcentagem que é a máxima relação entre os valores máximos do torque de atrito e do torque pico do motor apresentados nos catálogos usados neste trabalho, [DC MOTOR, 73], [DIRECT DIVE] e [MOTION CONTROL]. Nestas equações o termo da esquerda representa o torque eletromagnético, e os termos da direita representam as fontes de dissipações mecânicas internas ou operacionais do motor, devido a inércia, viscosidade e atrito seco do rotor, este último praticamente reduzido a zero nos projetos recentes [SHNEYDOR, 89]. A indutância da armadura foi desprezada, porque a análise foi feita para condições de regime permanente, o que permitiu que o análogo do torque equivalente aos reativos fosse também desprezado, por se tratar de uma análise para motores de corrente contínua.

i) Modelo dinâmico para um motor comercial sem carga

$$T_m = T_{mo} = J_m \ddot{q}_m + B_m \dot{q}_m + T_{fm} \quad (3.2)$$

ii) Modelo dinâmico de um motor ideal sem carga

$$T_m = T_{mo} = J_m \ddot{q}_m \quad (3.3)$$

ii) Modelo dinâmico de um motor linear

$$F_m = F_{mo} = m_m \ddot{q}_m \quad (3.4)$$

3.3.2 Os Modelos da Carga

A junta robótica é um caso especial de carga. O torque exigido pela junta, inclui quatro parcelas, uma parcela é relacionada com a colaboração direta na realização da tarefa do manipulador, as outras são para sustentação de uma ferramenta, da parte da estrutura que fica a sua frente, e finalmente da estrutura da própria junta.

O torque exigido por esta junta terá basicamente como componentes as forças de atrito, de coriolis, centrífugas, inerciais próprias e devido a interação com as demais juntas ou de acoplamento, atrito seco, atrito viscoso e devido a gravidade. Os esforços produzidos pela carga podem assumir quatro níveis de complexidade, a partir dos quais define-se uma nomenclatura que os separa em quatro modelos diferentes: GERAL, JECA, TIVE e SHNEY.

i) Modelo GERAL. - usando representação genérica da carga

Neste caso o torque da carga é representado pela equação 3.5.

$$T_{carga} = T_{ck} \quad (3.5)$$

Nas outras três modelos, JECA, TIVE e SHNEY, o torque da carga é representado respectivamente pelas equações 3.6 a 3.8, conforme os parâmetros de sua composição. A contribuição desta equação é essencial para a escolha da taxa de redução da junta, bem como do dimensionamento do torque do motor ideal, assim como da taxa de potência máxima e mesmo da taxa de aquecimento do motor.

ii) Modelo JECA - usando parâmetros cinemáticos

$$T_{carga} = d_{kk} \ddot{q}_k + c_{ijk}(q\dot{q})\dot{q}_k + T_{pk} \quad (3.6)$$

iii) Modelo TIVE - usando parâmetros dinâmicos

$$T_{carga} = T_{in} + T_{vis} + T_{pk} \quad (3.7)$$

onde $T_{in} = d_{kk} \ddot{q}_k$ é o torque inercial próprio, $T_{vis} = c_{ijk}(q\dot{q})\dot{q}_k$ é o torque devido a viscosidade, e T_{pk} é o torque de perturbação da junta.

iv) Modelo SHNEY - usando parâmetros dinâmicos

$$T_{carga} = T_{in} + T_{ekv} \quad (3.8)$$

$$\text{onde } T_{ekv} = T_{vis} + T_{pk} = T_{pk} \iff T_{vis} = 0$$

Para todos estes modelos, o torque externo ou de perturbação da carga pode ser representado por T_{pk} , inclui-se contribuições de torque das demais juntas sejam elas inerciais de acoplamento, coriolis, centrípeta, ou gravitacional como indicado abaixo, e as contribuições de torque devido as forças de coriolis, centrífuga, ou gravitacional da própria junta, como representado pela equação

$$T_{pk} = \sum_{j \neq k}^n d_{jk} \ddot{q}_k + \sum_k^n \sum_{i,j}^{j,k} c_{ijk} (q_i \dot{q}_j) \ddot{q}_k + T_{fk} + T_{util} + G_k \quad (3.9)$$

Esta equação mostra que uma otimização da estrutura do manipulador, e dos elos que o determinam, influem no tamanho do atuador, motor e redutor de cada junta, escolhidos para executar a função de acionamento mecânico, o que vem confirmar a utilidade de estudos em termos do dimensionamento dos elos, da compensação e eliminação de atritos, e da compensação ou balanceamento total ou parcial das massas das juntas, em torno dos seus eixos, na fase de projetos dos manipuladores.

3.3.3 Modelo do Motor Acoplado com a Carga

Uma vez que é aplicada uma carga no motor, ela exige deste motor um acréscimo de torque T_{carga} que produz uma elevação corrente neste motor, para aumentar o torque eletromagnético que é mostrado na expressão 3.10 que é a forma mais genérica de representar o torque do motor, e que pode assumir as formas mostradas pelas equações 3.2 para um motor comercial, 3.3 para um motor ideal, e 3.4 para um motor linear.

$$T_m = T_{mo} + T_{carga} \quad (3.10)$$

i) Modelo Dinâmico Genérico de Motor Ligado Diretamente a Carga

Para simples ilustração, usando o modelo de carga genérico da equação 3.5, e na equação 3.10, o modelo da junta carregada para acionamento direto adquire a forma mostrada na equação 3.11.

$$T_m = T_{mo} + T_{ck} \quad (3.11)$$

Já para o caso de acionamento indireto, há necessidade de um acoplador, dispositivo que serve de mediação, que transporta e/ou modifica a energia mecânica do motor para adequá-la a carga ou a tarefa, ver seção 2 de [SILVA, 98a]. O acoplador mais genérico possível é o redutor, que é visto pelo motor também como uma carga ligada diretamente a ele, assim. Neste caso a torque

externo total da carga é visto pelo motor através do redutor acrescido da carga do acoplador, conforme mostram as equações a seguir.

$$N\eta = \frac{T_{ck}}{T_{carga}} \text{ onde } T_{carga} = T_{ck} + T_{trans}. \quad (3.12)$$

Uma vez que não será feito um estudo minucioso do acoplador, para simplificação, o torque total visto pelo motor foi colocado como uma porcentagem do torque de carga (junta), na forma da eficiência η , e simultaneamente a taxa de redução N , vide 3.13. Outras variações deste modelo são obtidas conforme o tipo de acoplamento feito entre carga e motor, conforme mostram as equações 3.14 para transmissão, 3.15 e figura 3.3b, na conversão de movimento rotacional para linear e 3.16 que representa a conversão reduzida de movimento linear para rotacional. Veja caracterizações dos tipos acionamentos para juntas com movimentos rotacionais na figura 3.3.

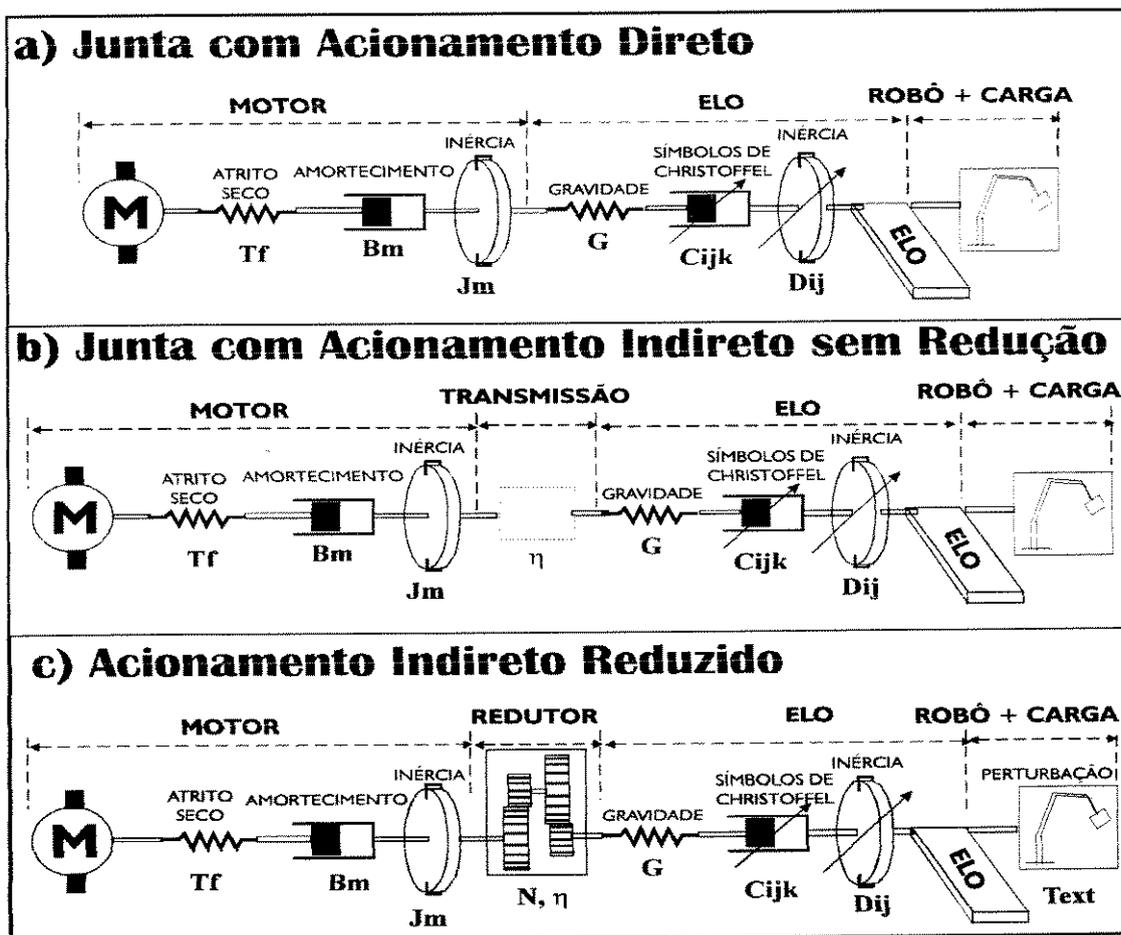


Figura 3.3: Tipos de acionamentos de juntas com movimentos rotacionais

ii) Modelo genérico de acoplamento reduzido do motor com a carga (movimento rotacional)

$$T_m = T_{mo} + \frac{T_{ck}}{N\eta} \quad (3.13)$$

iii) Modelo genérico de acoplamento não reduzido do motor com a carga (movimento rotacional)

$$T_m = T_{mo} + \frac{T_{ck}}{\eta} \quad (3.14)$$

iv) Modelo genérico do acoplamento não reduzido entre motor e carga (conversão de movimento rotacional em linear)

$$T_m = T_{mo} + \frac{F_{ck}X}{\eta} \quad (3.15)$$

v) Modelo genérico do acoplamento reduzido entre atuador e carga (conversão de movimento linear em rotacional)

$$F_m = F_{mo} + \frac{T_{ck}}{XN\eta} \quad (3.16)$$

3.4 Seleção de Motores de Corrente Contínua para Juntas com Acionamento Reduzido

O primeiro passo do processo de seleção de atuadores, seja ele qual for, é determinar os esforços produzidos nas juntas. No início desta seção será realizado um estudo para uma junta com acoplamento reduzido para os quatro modelos de representação da carga, e para os dois tipos de modelos de motores comerciais e genéricos, onde T_m é definido como torque eletromagnético de um motor acionando uma junta através de uma acoplamento, definindo as equações a conforme o modelo usada para representar a carga.

i) Modelo JECA - utilizando parâmetros cinemáticos

$$T_m - J_m\ddot{q}_m - B_m\dot{q}_m - T_{fm} = \frac{d_{kk}\ddot{q}_k + c_{ijk}(q\dot{q})\dot{q}_k + T_{pk}}{\eta N} \quad (3.17)$$

ii) Modelo TIVE - utilizando parâmetros cinemáticos

Observando esta expressão, pode-se escrever que ela é o torque inercial próprio da junta, $T_{in} = d_{kk}\ddot{q}_k$, e contém o torque de atrito viscoso devido ao movimento próprio da junta robótica, $T_{vis} = c_{ijk}(q\dot{q})\dot{q}_k$. A aceleração e a velocidade do motor podem ser substituídas pelo produto da

aceleração e velocidade da junta ou carga, multiplicados pela taxa de redução N . Assim pode-se reescrever a equação de torque útil e de perdas mecânicas internas no sistema de outra forma conforme mostrado abaixo.

$$T_m = J_m(N\ddot{q}_k) + B_m(N\dot{q}_k) + T_{fm} + \frac{T_{in} + T_{vis} + T_{pk}}{\eta N} \quad (3.18)$$

$$T_m = NT_{mc} + T_{fm} + \frac{T_{ck}}{\eta N}$$

onde o torque $T_{mc} = J_m\ddot{q}_k + B_m\dot{q}_k$, é definido como torque virtual do motor.

ii) Modelo GERAL - utilizando parâmetros cinemáticos

$$T_m = NT_{mc} + \frac{T_{ck}}{\eta N} \quad (3.19)$$

3.4.1 Capacidade de Carga do Motor Baseada na Estimação do Torque de Pico

No processo de seleção de atuadores, para que o motor possa suportar a carga durante todo o percurso previsto para a junta, é desejável que o motor que aciona a junta tenha um torque de pico T_{cat} superior ao torque eletromagnético máximo exigido do motor por esta carga, apesar do acoplamento do motor, que é expresso por qualquer uma das equações 3.17 a 3.19. T_{cat} é fornecido pelo fabricante do motor e apresentado em catálogos.

Baseado nesta afirmação pode-se escrever a inequação $T_{cat} \geq T_{mp}$. No princípio do processo de seleção do motor de uma junta, não se conhece o valor do torque eletromagnético máximo do motor da junta para a realização da tarefa desejada, pois a determinação deste torque depende da carga e do motor, e o motor ainda não foi escolhido. [SHNEYDOR, 89] e [PALHARES, 94] sugerem que este torque seja estimado em função dos valores de pico dos parâmetros T_{mp} , \ddot{q}_p , \dot{q}_p , T_{inp} , T_{visp} , T_{pkp} , T_{mcp} ou T_{ckp} , e que eles ocorram simultaneamente, o que não é necessariamente verdade, mas que garanta a validade da inequação.

[SHNEYDOR, 89] e [PALHARES, 94] calculam o torque de pico em função dos parâmetros cinemáticos. Aqui ele será representado em função dos parâmetros dinâmicos, conforme os modelos JECA, TIVE e GERAL, como mostram as três equações que seguem.

i) Modelo JECA - usando parâmetros cinemáticos

$$T_{cat} \geq T_{mp} = J_m(N\ddot{q}_{kp}) + B_m(N\dot{q}_{kp}) + \frac{d_{kkp}\ddot{q}_k + c_{ijkp}(q\dot{q})\dot{q}_{kp} + T_{pkp}}{\eta N} \quad (3.20)$$

ii) Modelo TIVE - usando parâmetros dinâmicos discriminados

$$T_{cat} \geq T_{mp} = J_m(N\ddot{q}_{kp}) + B_m(N\dot{q}_{kp}) + \frac{T_{inp} + T_{visp} + T_{pkp}}{\eta N} \quad (3.21)$$

iii) Modelo GERAL - usando parâmetros dinâmicos generalizados

$$T_{cat} \geq T_{mp} = NT_{mcp} + \frac{T_{ckp}}{\eta N} \quad (3.22)$$

3.4.1.1 Determinação da Taxa de Redução

O motor acoplado que tem o melhor torque de pico, é aquele que fornece o menor torque de pico apesar do acoplamento, será mostrado que isto ocorre quando o torque de pico desacoplado for igual ao torque de pico acoplado, ou seja fator de acoplamento $G(N) = 1$. Que é obtido quando o torque total da parte direita de uma das três equações acima conforme modelo usado for o mínimo possível. Portanto, quando a derivada do torque de pico em função da taxa de redução mostradas nas três inequações acima for nula, conforme o modelo desejado, neste ponto se têm-se um redutor ótimo (conforme equação 3.23).

i) Modelo GERAL

$$\frac{\partial}{\partial N} \left[T_{mp} \geq NT_{mcp} + \frac{T_{ckp}}{\eta N} \right] = 0 \Rightarrow T_{mcp} - \frac{T_{ckp}}{[N\eta]^2} = 0 \quad (3.23)$$

Isolando-se N nesta equação, encontra-se duas raízes iguais com sinais opostos. Na prática, a taxa de redução é um valor positivo, logo a raiz N positiva deve ser a escolhida, e é igual a raiz quadrada da razão entre o torque de pico total da carga ou junta e o produto rendimento do redutor pelo torque virtual do motor conforme conceitos apresentados na introdução deste capítulo.

$$Np = \sqrt{\frac{T_{ckp}}{\eta T_{mcp}}} \quad (3.24)$$

ii) Modelo SHNEY

$$Np = \sqrt{\frac{T_{inp} + T_{ekvp}}{\eta [J_m \ddot{q}_{kp} + B_m \dot{q}_{kp}]}} \quad (3.25)$$

iii) Modelo TIVE

$$Np = \sqrt{\frac{T_{inp} + T_{visp} + T_{ekp}}{\eta [J_m \ddot{q}_{kp} + B_m \dot{q}_{kp}]}} \quad (3.26)$$

iv) Modelo JECA

$$N_p = \sqrt{\frac{d_{kkp}\ddot{q}_{kp} + c_{ijkp}(q\dot{q})\dot{q}_{kp} + T_{pkp}}{\eta[J_m\ddot{q}_{kp} + B_m\dot{q}_{kp}]}} \quad (3.27)$$

O ideal seria que as dissipações do sistema fossem predominantemente inerciais, tanto internamente no motor como em relação a carga. Os motores usados para acionar juntas robóticas devem ser de boa qualidade e devem apresentar baixos fatores de amortecimento. Uma carga robótica típica exige baixa velocidade e alta aceleração, isto gera torques inerciais elevados em relação ao torque de amortecimento aliado a compensação do torque gravitacional em torno dos eixos nos elos. Estas operações denominadas de *peak in place*, podem fazer com que o modelo do sistema se aproxime do ideal, e se poderia desprezar os torque devido à velocidade, sugerindo uma expressão mais simplificada para a taxa de redução.

$$N_{pi} = \sqrt{\frac{T_{inp}}{\eta J_m \ddot{q}_{kp}}} \quad (3.28)$$

Como se trata de uma carga robótica, o sistema é adaptativo conforme as configurações da cadeia cinemáticas. Neste caso o torque inercial de pico $T_{inp} = d_{kk}\ddot{q}_{kp}$ dependeria somente da aceleração de pico e da inércia da carga que seriam variáveis, neste caso a taxa de redução poderia ser rescrita conforme a equação 3.29.

$$N_{pi} = \sqrt{\frac{d_{kkp}}{\eta J_m}} \quad (3.29)$$

Caso o sistema não fosse adaptativo conforme as configurações das cadeias cinemáticas, por exemplo uma esteira carregando uma carga sólida, a inércia seria constante, J_{ck} .

$$N_{pi} = \sqrt{\frac{J_{ck}}{\eta J_m}} \quad (3.30)$$

3.4.1.2 Critério de Seleção pelo Torque de Carga

Trabalhando-se com um Modelo GERAL e usando-se um motor comercial, a inequação 3.22, que limita o torque do motor para satisfazer as exigências de carga e acoplamento, pode ser reorganizada em função da taxa de acoplamento para torque máximo mostrada na equação 3.24. Isto é determinado dividindo ambos os lados pelo momento de inércia do motor, e multiplicando e dividido seu segundo termo por $2\sqrt{T_{cmp}T_{ckp}\eta}$. O resultado é mostrado pelas equações 3.31 a 3.33.

$$T_{cat} \geq T_{mp} = T_{ca}G(N) \quad (3.31)$$

onde

$$T_{ca} = 2\sqrt{\frac{T_{cmp}T_{ckp}}{\eta}} \quad (3.32)$$

$$G(N) = \frac{1}{2} \left[\frac{N}{Np} + \frac{Np}{N} \right] \quad (3.33)$$

Como pode-se notar, a equação 3.31, é determinada em função de dois termos, $G(N)$ que é o grau ou fator de acoplamento entre a carga e o motor através do redutor, definido na equação 3.33, e T_{ca} que é definido como torque de carga mostrado na equação 3.32.

Tomando como base o caso dos motores convencionais ou comercialmente disponíveis, o torque de carga T_{ca} é o máximo torque exigido do motor pelo sistema desacoplado.

Como a taxa de acoplamento atinge seu valor mínimo, que vale 1, quando usado um redutor com taxa de redução igual àquelas estabelecidas pelas equações 3.24, a 3.27, conforme a modelo de representação da carga, pode-se dizer que T_{ca} é o mínimo torque que o motor deve oferecer para acionar uma carga acoplada com qualquer taxa de acoplamento. Isto ocorre analogamente para os modelos ideais.

Assim fica definido o primeiro critério de seleção de atuadores utilizado como preliminar, uma vez que a taxa de redução real ainda não foi encontrada, e consiste em verificar a desigualdade $T_{cat} \geq T_{ca}$ 3.41, que fica definida e determinada uma vez que a carga e os parâmetros de catálogos sejam conhecidos.

$$T_{cat} \geq T_{ca}G(N) \geq T_{ca} \Rightarrow T_{cat} \geq T_{ca} \quad (3.34)$$

Este processo pode ser visualizado como indica a figura 3.4, que foi chamada de espaço de seleção de atuadores, mas que na realidade se trata de dois planos definidos ortogonalmente. O primeiro plano é definido pelo torque eletromagnético T_{ca} do motor da junta em função do tempo de realização da tarefa especificada para o manipulador, que é independente da taxa de acoplamento. O segundo plano é definido pela expressão do torque eletromagnético do motor em função do eixo das possíveis taxas de acoplamento para este acionamento, vide equação 3.32, e pelo torque de pico T_{cat} do motor candidato ao acionamento da junta que é fornecido pelo catálogo dos motores.

Os dois planos se intercedem no ponto onde a função do primeiro plano atinge o seu máximo, que é determinado pela simulação do modelo dinâmico considerando o motor tomado como se fosse o motor final escolhido para a junta, este valor é o mínimo valor da função do segundo plano. Este valor mínimo pode ser acrescido de uma certa porcentagem do torque máximo da função do primeiro plano, que é a chamada margem de erro decorrente de grandezas não modeláveis ou desprezadas.

Estes aspectos são originalmente introduzidos por este trabalho, já que os demais artigos conhecidos e mencionados, vide [SHNEYDOR 89], [DC MOTOR, 73], e [PALHARES, 94], não

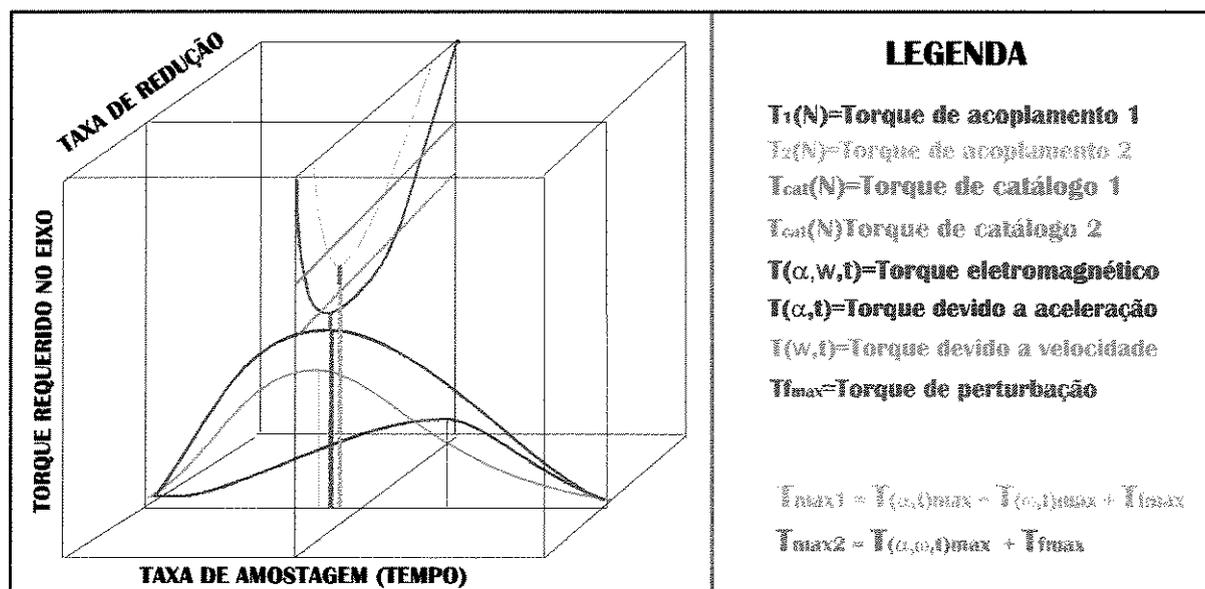


Figura 3.4: Espaço do processo de seleção de atuadores

trabalham com este primeiro plano, o qual permite que o motor seja escolhido com mais precisão e evitando o superdimensionamento decorrente da estimação do torque máximo daquela curva. Pois para os demais autores, o mínimo da função do segundo plano é determinado considerando que o torque máximo ocorre quando os máximos das variáveis integrantes (ou torque parciais) do torque total resistivo do motor, ocorrem simultaneamente. O que não é verdade, muito embora seja útil para fornecer um bom valor inicial num método recursivo.

3.4.1.3 Taxa de Potência, um Critério Usual,

Nos catálogos de motores, a taxa de potência do motor usualmente é calculada pela equação 3.35.

$$\dot{P} = T^2 / J_m \tag{3.35}$$

i) Modelo GERAL

A equação 3.35 sugere que elevando-se a inequação 3.41 ao quadrado, e dividindo-a em seguida pela inércia dos motores, encontra-se a inequação 3.36, que mostra que a taxa de potência do acoplamento não deve superar a taxa de potência do motor, assim como ocorre na determinação do torque. Isto define uma faixa de taxa de redução na qual o motor pode satisfazer as condições de carga e acoplamento, vide ilustração da figura 3.5.

$$\dot{P}_{cat} \geq \dot{P}_{ac} = \dot{P}_{ck} G^2(N) \geq \dot{P}_{ck} \quad (3.36)$$

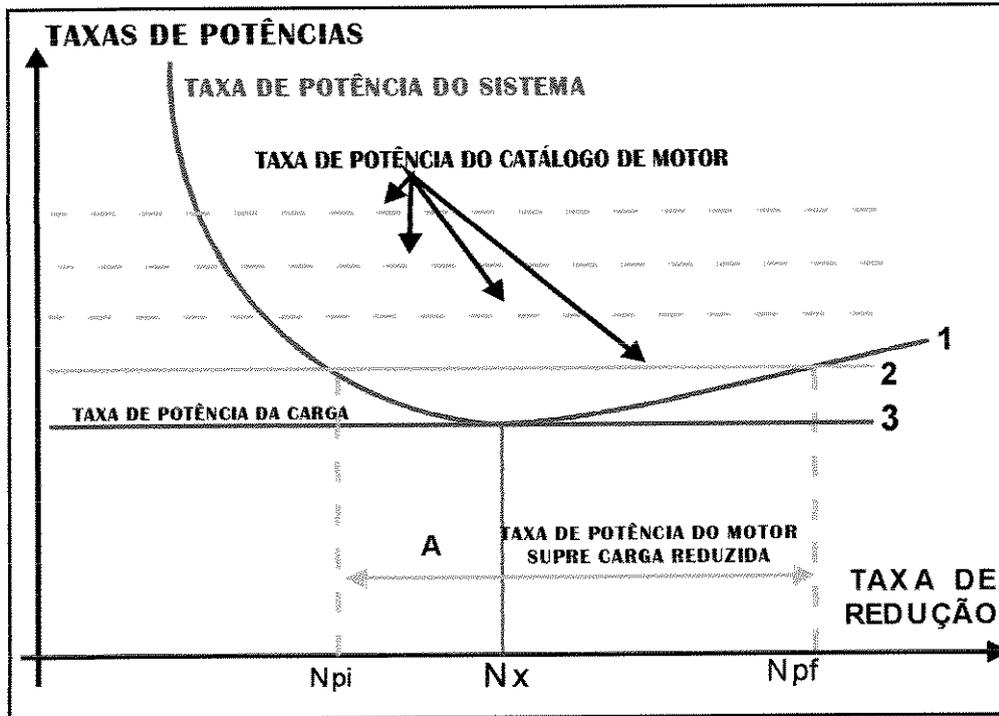


Figura 3.5: Limitações das taxas de acoplamento em função das taxas de potências

onde \dot{P}_{ck} é a taxa de potência de carga e definido na equação 3.37,

\dot{P}_{ac} é a taxa de potência de acoplamento e

\dot{P}_{cat} é a taxa de potência do motor que é determinada pelo fabricante e apresentada em catálogos.

$$\dot{P}_{ck} = \frac{T_{mp}^2}{J_m} = 4 \frac{T_{cmp} T_{ckp}}{\eta J_m} \quad (3.37)$$

Num processo análogo a este, encontra-se as taxas de potência das cargas para cada um dos modelos de tratamento da carga restante, onde o torque de carga assume os valores das expressões abaixo.

ii) Modelo JECA

$$\dot{P}_{ck} = 4 \frac{[J_m \ddot{q}_{kp} + B_m \dot{q}_{kp}] [d_{kkp} \ddot{q}_{kp} + c_{ijkp} (q\dot{q}) \dot{q}_{kp} + T_{pkp}]}{\eta J_m} \quad (3.38)$$

iii) Modelo TIVE

$$\dot{P}_{ck} = 4 \frac{[J_m \ddot{q}_{kp} + B_m \dot{q}_{kp}][T_{inp} + T_{visp} + T_{ekp}]}{\eta J_m} \quad (3.39)$$

iv) Modelo SHNEY

$$\dot{P}_{ck} = 4 \frac{[J_m \ddot{q}_{kp} + B_m \dot{q}_{kp}][T_{inp} + T_{ekvp}]}{\eta J_m} \quad (3.40)$$

De forma análoga à definição dos limites do torque, define-se os limites da taxa de potência, lembrando que a taxa de potência do motor deve ser superior a taxa de potência da carga. Estas são as duas taxas de potências definidas e determinadas até aqui. Isto define mais um critério preliminar que poderia ser usado. Neste trabalho, tal critério é considerado importante para a escolha dos atuadores.

A taxa de potência de carga P_{ca} é a máxima taxa de potência exigida do motor pelo sistema considerado desacoplado, mas também é a mínima taxa de potência que o motor deve ter para acionar uma carga acoplada, porque a taxa de acoplamento atinge seu valor mínimo quando é usado um redutor com taxa de redução $N = Np$, igual àquelas estabelecidas pelas equações 3.24, a 3.27. Assim este critério consiste em verificar a desigualdade da equação abaixo.

$$P_{cat} \geq P_{ca} \quad (3.41)$$

3.4.2 Capacidade de Carga do Motor Baseada na Simulação do Torque de Pico

Hoje o avanço das tecnologias computacionais permitem a simulação dos processos. Simulando-se o modelo dinâmico do processos robóticos para realização de uma determinada tarefa, pode-se determinar com precisão o valor do **torque de pico do motor desacoplado** para esta tarefa, e quando isto ocorrer para o mesmo instante que ele for registrado, registrar simultaneamente os valores dos demais torques e parâmetros do processo que contém nos seus são sub-índices um x no que que informa que cada variável determinada, ou seja T_{inx} , T_{vix} , T_{pkx} , N_x , T_{mx} , \ddot{q}_x , \dot{q}_x , T_{inx} , T_{vix} , T_{ex} , T_{mcx} , d_{kkx} , c_{ijkx} , ou T_{cx} foi encontrada no mesmo instante, ou seja, simultaneamente à determinação do torque de pico do motor desacoplado.

3.4.2.1 Torque de Pico

A determinação do torque de pico eletromagnético pelo método da simulação discutido nesta seção 3.4.2, fornece como resposta um valor **no máximo igual** ao valor encontrado no método da estimação conforme as equações 3.20 a 3.22 e 3.23 da seção 3.4.1, para cada um dos os

modelos, o que indica que o método da simulação é mais preciso. Isto evita a escolha de um motor sobredimensionado para a junta, como será mostrado à frente.

$$T_m \geq T_{mx} = J_m(N\ddot{q}_{kx}) + B_m(N\dot{q}_{kx}) + \frac{T_{inx} + T_{vix} + T_{pkx}}{\eta N_x} = NT_{mex} + \frac{T_{ckx}}{\eta N} \quad (3.42)$$

3.4.2.2 Determinando a Taxa de Redução

A taxa de acoplamento para o método da simulação é determinado, procedendo-se com a equação 3.42, como procedeu-se para a equação 3.22 através das operações mostradas na equação 3.23 para chegar na equação 3.24 para o o modelo GERAL, encontrando-se a equação da taxa de acoplamento ideal da equação 3.43, para o modelo SIMUL-GERAL. Analogamente, para os demais modelos SHNEY, TIVE e JECA cujas respostas são fornecidas pelas equações 3.25 a 3.27, encontram-se as equações 3.44 a 3.46, para os modelos SIMUL-SHNEY, SIMUL-TIVE e SIMUL-JECA, onde os parâmetros destas equações deixam de ser os valores de pico, e passam a ser os parâmetros encontrados no instante do torque desacoplado máximo.

i) Modelo SIMUL-GERAL

$$N_x = \sqrt{\frac{T_{mex}}{\eta T_{ckx}}} \quad (3.43)$$

ii) Modelo SIMUL-SHNEY

$$N_x = \sqrt{\frac{T_{inx} + T_{ekvx}}{\eta [J_m \ddot{q}_{kx} + B_m \dot{q}_{kx}]}} \quad (3.44)$$

iii) Modelo SIMUL-TIVE

$$N_x = \sqrt{\frac{T_{inx} + T_{visp} + T_{ekx}}{\eta [J_m \ddot{q}_{kx} + B_m \dot{q}_{kx}]}} \quad (3.45)$$

iv) Modelo SIMUL-JECA

$$N_x = \sqrt{\frac{d_{kkx} \ddot{q}_k + c_{ijkx}(q\dot{q}) \dot{q}_{kpx} + T_{pkx}}{\eta [J_m \ddot{q}_{kx} + B_m \dot{q}_{kx}]}} \quad (3.46)$$

Num sistema ideal os torques do motor e carga devem ser predominantemente inerciais, o que seria tão próximo da realidade tanto quanto maior for a compensação do desequilíbrio dos momentos dos elos em torno dos eixos dos juntas. Assim a expressão simplificada para a taxa de redução será:

$$Ninx = \sqrt{\frac{T_{inx}}{\eta J_m \ddot{q}_{kx}}} \quad (3.47)$$

Quando o torque inercial de pico T_{inx} for variante, ele é determinado pelo produto de inércia d_{kkx} e aceleração \ddot{q}_{kx} . Assim a taxa de redução será.

$$Ninx = \sqrt{\frac{d_{kkx}}{\eta J_m}} \quad (3.48)$$

Se o equipamento fosse linear e a carga constante, o sistema poderia ter um comportamento invariante, assim a inércia seria constante J_{ck} , e a carga dependeria somente da aceleração \ddot{q}_{kx} . Somente neste caso particular, a taxa de acoplamento $Ninx$ para taxa de potência ótima, é exatamente igual a taxa de acoplamento Npi determinada pelo método da estimação conforme a equação 3.30.

3.4.2.3 Torque de Carga, Critério Preliminar de Seleção

A obtenção do torque de pico para o processo por simulação é determinado de forma análoga a do processo por estimação, vide seção 3.4.1.2

a) Para modelo de motor convencional

$$T_{cat} \geq T_{ac} = T_{ckx} G_x(N) \geq T_{ck} \quad (3.49)$$

$$T_{ckx} = 2\sqrt{\frac{T_{mcx} T_{ckx}}{\eta}} \quad (3.50)$$

Onde $G_x(N)$ é o grau de acoplamento entre a carga e o motor através do redutor, vide equação 3.51

$$G_x(N) = \frac{1}{2} \left[\frac{N}{N_x} + \frac{N_x}{N} \right] \quad (3.51)$$

Deve ser lembrado aqui que $T_{cat} \geq T_{ck}$, ficam determinados e conhecidos e atuam como uma condição preliminar para a escolha de atuadores para a junta do manipulador.

3.4.2.4 Escolha Preliminar Usando a Taxa de Potência da Carga

A taxa de potência conforme apresentada na seção 3.4.1.3 é:

$$\dot{P}_{cat} \geq \dot{P}_{ac} = \dot{P}_{ckx} G_x^2(N) \geq \dot{P}_{ckx} \quad (3.52)$$

onde $G_x^2(N)$ é definido na equação 3.51, e a taxa de potência de carga, conforme o modelo é definida a seguir, contudo deve se lembrar, que os valores dos parâmetros aqui são bem precisos, e portanto não dependem de qualquer que for o modelo.

i) Modelo SIMUL-GERAL

$$\dot{P}_{ckx} = 4 \frac{T_{mcx} T_{ckx}}{\eta J_m} \quad (3.53)$$

ii) Modelo SIMUL-JECA

$$\dot{P}_{ckx} = \frac{[J_m \ddot{q}_{kx} + B_m \dot{q}_{kx}][d_{kkx} \ddot{q}_{kp} + c_{ijkx}(q\dot{q})\dot{q}_{kx} + T_{pkx}]}{\eta J_m} \quad (3.54)$$

iii) Modelo SIMUL-TIVE

$$\dot{P}_{ckx} = 4 \frac{[J_m \ddot{q}_{kx} + B_m \dot{q}_{kx}][T_{inx} + T_{visx} + T_{ekx}]}{\eta J_m} \quad (3.55)$$

iv) Modelo SIMUL-SHNEY

$$\dot{P}_{ckx} = 4 \frac{[J_m \ddot{q}_{kx} + B_m \dot{q}_{kx}][T_{inp} + T_{ekvx}]}{\eta J_m} \quad (3.56)$$

Quando for satisfeito a igualdade, ou seja um redutor cuja taxa de redução $N = Nx$, ou seja igual a taxa de redução ótima, o grau de acoplamento vale $G(Nx) = 1$ que é o mínimo valor possível, neste caso a taxa de potência do motor deve ser no mínimo igual a taxa de potência da carga, $\dot{P}_{cat} \geq \dot{P}_{ckx}$

3.4.3 Critérios das Condições Cinemáticas

Uma vez escolhido o motor e determinado o redutor, o processo de escolha continua, pois, falta verificar se o motor escolhido atende as condições cinemáticas e pré-determinadas para a junta dependendo da tarefa do manipulador, ou seja, se ele consegue impor a velocidade e aceleração de pico máximas exigida na carga.

3.4.3.1 Análise da Velocidade de Motores cc, em Regime Permanente

Antes de trabalhar com a velocidade angular do motor, é conveniente definir as unidades de trabalho. Alguns catálogos como [DC MOTOR, 73] apresentam a velocidade angular em rotações por minuto [*rpm*] e que é a unidade no Sistema Inglês de Medidas MKS, outros catálogos como [MOTION CONTROL] e [DIRECT DRIVE] as utilizam no Sistema Internacional SI em [*rad/s*]. Como o SI é a tendência mundial, a conversão da medida de velocidade angular do MKS para o SI, é obtida multiplicando-se a o valor encontrado pelo fator $f_c = 9.5493$ ($W_c = n_c = f_c \dot{\theta}_{ck}$).

No estudo dos critérios que consideram os limites de velocidade, há três condições interessantes para o estudo de um motor acionando uma carga, que são carga máxima, carga genérica e carga nula.

i) **Para a condição de motor com carga genérica**, a tensão nos terminais do motor é $E_t = RI + KeW$ determinada pela força contra-eletromotriz Ke , a velocidade do eixo W e pela queda de tensão devido a circulação da corrente I na resistência da armadura R . Neste caso foi considerado que o motor de corrente contínua atuando em regime permanente, portanto a queda de tensão $L \frac{di}{dt}$ na indutância L da armadura foi desprezada.

Assim, pode-se equacionar a velocidade do motor em função destes parâmetros, $W = E_t/Ke - RI/Ke$, mas como a corrente elétrica do motor $I = T/Kt$, pode ser escrita em função do torque eletromagnético do motor T , e da sensibilidade ou constante de torque Kt , a velocidade do motor pode ser ainda escrita em função destes parâmetros $W = Ep/Ke - RT/(KtKe)$

ii) **Para a condição de motor com carga máxima**. Por analogia ao caso anterior, pode-se determinar a equações de tensão terminal $Ep = RpIp + KeWp$, velocidade $Wp = Ep/Ke - RpIp/Ke$, $Ip = Tp/Ktp$, em função, agora da resistência da armadura Rp , sensibilidade Ktp , para torque de pico Tp , onde a velocidade para a corrente elétrica de carga máxima vale $Wp = Ep/Ke - RpTp/(KtKe)$

iii) **Para a condição de motor operando sem carga** o torque de carga é nulo, $To = 0$ e a corrente alimenta somente as perdas do funcionamento do motor, podendo ser considerada desprezível em relação às correntes do motor com carga, assim a tensão nos terminais pode ser dada por $Eo = KeWo$, logo a velocidade do eixo é $Wo = Eo/Ke$.

Uma vez que a fonte de alimentação é de corrente contínua, e que não ocorre queda desta tensão no circuito alimentador nas três condições mencionadas anteriormente, a tensão nos terminais do motor $E_t = E_o = E_p$ e conseqüentemente a razão entre as tensões terminais e a constante de força contraeletromotriz $E_t/Ke = Ep/Ke = Eo/Ke = Wo$ são constantes.

Desta forma a velocidade para motor com carga genérica é $W = Wo - RI/Ke = Wo - RT/(KtKe) = Wo - \Delta W$ onde a queda de velocidade por efeito Joule para motor com carga genérica é $\Delta \dot{\theta} = RI/Ke = RT/KtKe$. Conseqüentemente a velocidade de operação do motor para uma carga genérica W é dada pela velocidade em vazio Wo menos a queda devido as

perdas térmicas na armadura $\Delta\dot{q} = RT/(KtKe)$. Na condição de carregamento máximo, a queda é máxima e vale $\Delta\dot{q} = RI_p/Ke = RpTp/(KtpKe)$.

W_o é a máxima velocidade que o motor pode conseguir desde que em vazio, e W_p é a menor velocidade que o motor consegue com carga plena sem ter problema de sobreaquecimento a menos que haja alteração na intensidade da refrigeração ou no nível de tensão.

$$W_p = W_o - \frac{RpIp}{Ke} = W_o - \frac{RpTp}{KtpKe} \quad (3.57)$$

Logo, dependendo do torque máximo que a carga requer do motor, determina-se a tensão máxima. Dependendo da tensão máxima determina-se a faixa de velocidade que é função do torque de pico e da velocidade em vazio.

$$\frac{E_o}{Ke} = W_o \geq W \geq W_p = W_o - \frac{RpIp}{Ke} = W_o - \frac{RpTp}{KtpKe} \quad (3.58)$$

A velocidade eficaz na carga quando o motor é controlado pela tensão de armadura é determinada pela tensão média na armadura, ou pela razão entre as larguras dos pulsos positivos e dos pulsos negativos da tensão instantânea imposta por um circuito de chaveamento, que pode ser efetivado, por exemplo através de circuitos do tipo Modulador por Largura de Pulso, do tipo inversor, tecnicamente conhecido como PWM, *Pulse Width Modulation*, como aquele apresentado por [MERCHI, 93].

Por esta razão a maior velocidade que o motor carregado pode impor, sem que ele opere causando danos a si próprio, é a velocidade em vazio, ou seja sem carga, menos a queda de velocidade devido as perdas por circulação de corrente na resistência da armadura. Quanto mais intenso for o torque máximo de operação do motor acoplado a carga, desde que este não ultrapasse o torque de pico do motor determinado pelo fabricante em catálogo, maior será a queda de tensão e menor será a velocidade (vide figura 3.6).

Como o maior aproveitamento dinâmico do motor ocorre próximo do torque de pico, baseado na curva de torque velocidade, não deve-se esperar uma velocidade de operação contínua para o motor acoplado a carga regida pela equação 3.59. Assim, no processo de seleção do motor deve ser verificado se a velocidade de carga W_c referida ao lado do motor por causa do acoplamento W_{cm} , atende a condição imposta pela equação 3.59 para que o funcionamento do motor, sem problemas para a carga. Isto determina um outro critério de seleção de atuadores.

$$W_{cm} = NW_c \leq NW_p = N \left[W_o - \frac{RI_p}{Ke} \right] = N \left[W_o - \frac{RpTp}{(KtpKe)} \right] \quad (3.59)$$

Assim, encontra-se também um limite da taxa de redução, neste caso.

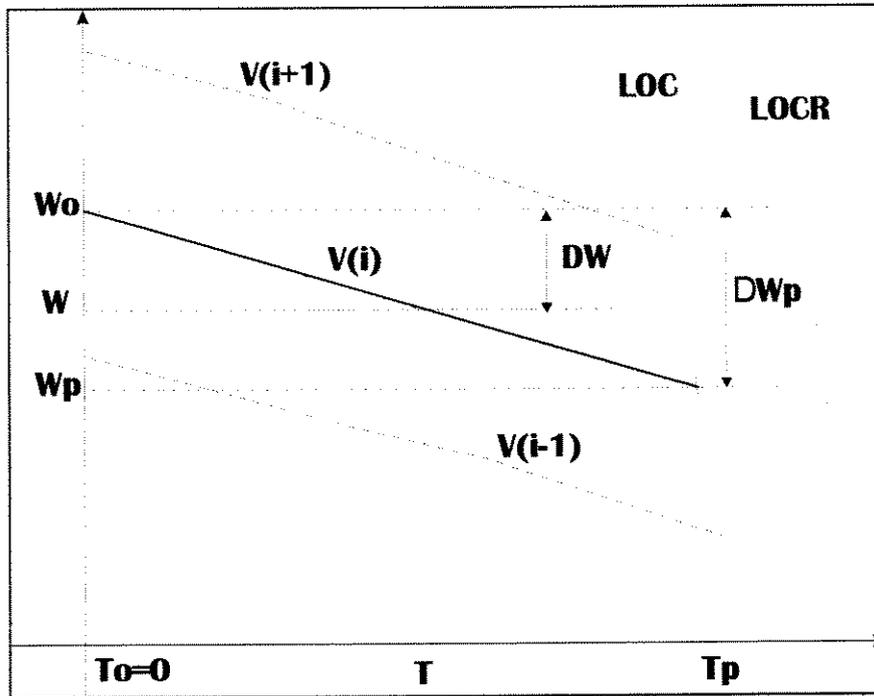


Figura 3.6: Curva característica torque × velocidade para motores de corrente contínua.

$$N \leq \frac{W_p}{W_c} = \frac{W_o}{W_c} - \frac{R_p I_p}{K_e W_c} = \frac{W_o}{W_c} - \frac{R_p T_p}{K_t p K_e W_c} \quad (3.60)$$

Apesar de tudo, é possível que o sistema realize operações com velocidade máxima maior ficando subdimensionado com um torque T_x , seguindo com cuidado a equação 3.61, desde que a velocidade máxima do sistema mais a queda $R_x T_x / (K_t x K_e)$ que é típica da condição de carga T , não ultrapasse a velocidade em vazio. Apesar disto a equação 3.59 é mais segura, pois garante que o motor consiga suportar uma carga no máximo igual ao torque de pico.

$$W_{cm} = N W_{cx} = N \left(W_o - \frac{R_x I_x}{K_e} \right) = N \left[W_o - \frac{R_x T_x}{(K_t x K_e)} \right] \leq W_o = E_o / K_e \quad (3.61)$$

Neste caso a taxa de redução deve ser regida pela equação 3.62.

$$N \leq \frac{W_x}{W_c} = \frac{W_o}{W_c} - \frac{R_x I_x}{K_e W_c} = \frac{W_o}{W_c} - \frac{R_x T_x}{K_t p K_e W_c} \quad (3.62)$$

Assim sendo, a análise da velocidade permite estabelecer dois parâmetros do processo de seleção de atuadores:

i) A velocidade que é determinada para a junta baseada na análise cinemática do sistema, não deve superar a velocidade máxima que o motor pode alcançar, a qual

pode variar em função das condições de carga que dependem da refrigeração e do nível de tensão adotados.

1– Se o motor for usado na condição de carga máxima T_p , que é o pior caso, a velocidade do motor deve satisfazer a inequação 3.59.

2– Se o torque de carga máximo do sistema T_x for menor que a torque de pico do motor, a velocidade máxima da carga deve ser regida pela equação 3.61, ficando superior a velocidade de pico do motor, estabelecida na equação 3.59.

ii) - A taxa de redução do acoplamento deve satisfazer,

1– Se o motor for usado na condição de carga máxima T_p , que é o pior caso, a taxa de acoplamento, ou de redução, deve satisfazer a inequação 3.60.

2– Se o torque de carga T_x do sistema é máximo, a taxa de redução é estabelecida pela equação 3.62.

3.4.3.2 A Aceleração do Motor

A aceleração máxima do motor é apresentada em catálogos. Impor um valor de aceleração para o sistema que a supere é desaconselhável, por isto os parâmetros de catálogos devem ser no mínimo iguais aos exigidos na junta multiplicados pela taxa de redução, $\ddot{q}_{cat} \geq N\ddot{q}_{kx}$.

A aceleração de carga do sistema genérico de uma junta, vide equação 3.63, é obtida através do modelo dinâmico da junta que é do tipo $Tm = \ddot{q}_{ck}J_{eq} + \frac{T_{ex}}{N\eta}$, onde $J_{eq} = J_mN + \frac{J_c}{N\eta}$, que é o momento de inércia equivalente a associação de motor e carga. Observando-se esta equação, pode-se verificar que a aceleração aumenta com o aumento do torque eletromagnético do motor Tm , do rendimento η , e da taxa de acoplamento N , e diminui com o aumento do torque de perturbação da carga T_{ex} e a inércia equivalente J_{eq} .

$$\ddot{q}_{ck} = \frac{Tm - \frac{T_{ex}}{N\eta}}{J_mN + \frac{J_c}{N\eta}} = \frac{TmN\eta - T_{ex}}{J_mN^2\eta + J_c} \quad (3.63)$$

Quando um motor está operando em vazio, o momento de inércia J_c e contribuição da torque T_{carga} são nulos, e a aceleração é a máxima possível até ele atingir o regime permanente, onde a velocidade é constante e a aceleração nula.

A aceleração de máxima experimentada pela carga na realização da tarefa é \ddot{q}_{ckp} que corresponde à aceleração $\ddot{q}_{mp} = N\ddot{q}_{mp}$ do lado do motor através do redutor cuja taxa de acoplamento é N , e não deve superar a aceleração máxima definida pelo catálogo do fabricante como define a equação 3.64.

$$\ddot{q}_{cat} \geq \ddot{q}_m = N\ddot{q}_{ckp} \quad (3.64)$$

Esta aceleração é imposta pela carga e determinada com a resolução da cinemática da junta, e é vista pelo motor reduzida pelo acoplador. Por esta razão a aceleração define o critério através do qual se limita se escolhe a taxa de redução do acoplador, conforme a equação 3.65, e cujos parâmetros são impostos pelos valores requeridos pela carga e pelo limite apresentado pelo fabricante do motor.

$$N \leq \frac{\ddot{q}_{cat}}{\max |\ddot{q}_k|} \quad (3.65)$$

Assim fica definido um critério para a aceleração anunciado em seguida.

ii) **No ponto de aceleração máxima exigido pela tarefa, deve ser garantido que a taxa de acoplamento do redutor esteja dentro daquele limite imposto pela equação 3.65. Caso isto não ocorra, deve-se escolher outro motor no catálogo.**

Se esta condição não for satisfeita, a taxa de redução poderá estar alta demais e deve ser recalculada, se tiver um valor muito baixo e distante de Np ou Nx , poderá ser necessário fazer um novo ciclo de cálculo.

De uma forma geral, considerando tanto a velocidade quanto para a aceleração, a taxa de acoplamento do redutor nunca deve superar a relação entre a máxima e velocidade ou aceleração que o motor pode fornecer (que é dada pelos catálogos) e máxima velocidade ou aceleração de carga, veja equações 3.66 e 3.67, e também figura 3.7.

$$\dot{q}_{cat} \geq N\dot{q}_{ck} \rightarrow N \leq \frac{\dot{q}_{cat}}{\dot{q}_{ck}} \quad (3.66)$$

$$\ddot{q}_{cat} \geq N\ddot{q}_{ck} \rightarrow N \leq \frac{\ddot{q}_{cat}}{\ddot{q}_{ck}} \quad (3.67)$$

3.4.4 Investigação do Aquecimento dos Atuadores para as Condições da Junta

Como foi visto anteriormente, há diversas fontes de perda por aquecimento nos motores. No caso dos motores de corrente contínua convencionais pode ser citadas perdas por atrito seco nos mancais e as perdas nos enrolamentos de campo, mas a principal contribuição é devido as perdas por efeito joule no enrolamento da armadura situado no rotor do motor.

A consideração das perdas no motor dependendo de sua utilização, relacionadas ao seu ambiente de trabalho e às condições de operações, é de grande importância no processo de seleção dos atuadores. A definição geral das perdas por efeito joule estimada para o motor é simbolizada por Pa e determinada pelo produto da resistência da armadura R pelo quadrado da corrente eficaz \tilde{I}_2 . Por sua vez, a corrente eficaz da armadura do motor é definida por $\tilde{I}^2 \triangleq \frac{\tilde{T}_m}{K_t}$, onde \tilde{T}_m é o eletromagnético eficaz do motor carregado e K_t é a sensibilidade ou constante de torque do motor.

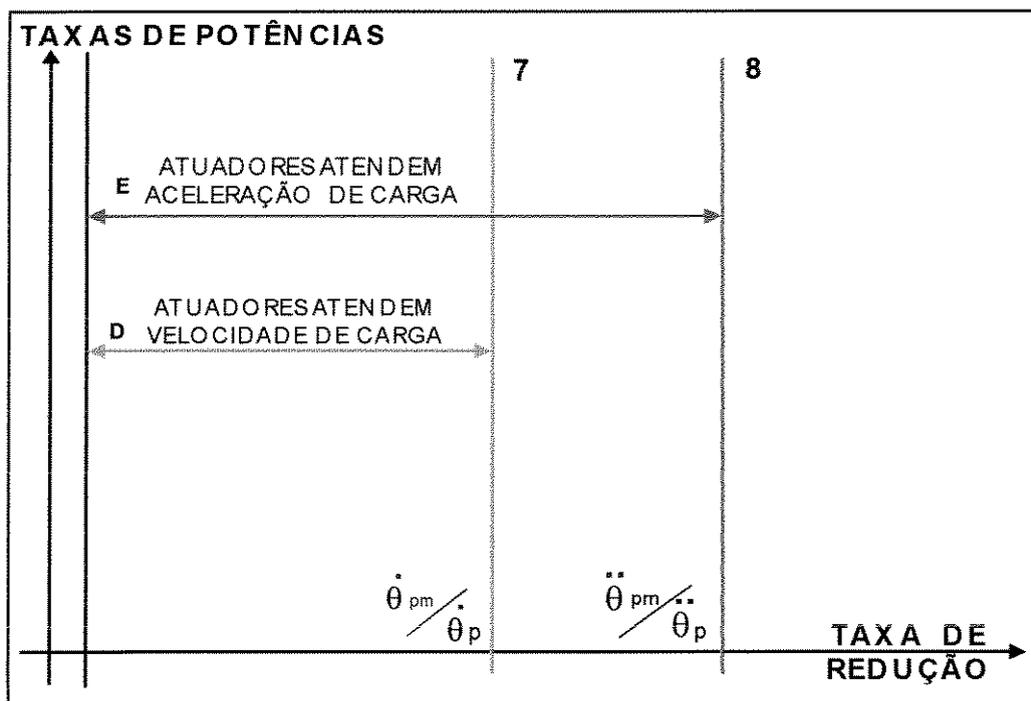


Figura 3.7: Limitações da taxa de acoplamento em função da velocidade e aceleração.

$$P_a \Delta R \tilde{I}^2 = R \frac{\tilde{T}_m^2}{K_t^2} \tag{3.68}$$

As perdas na armadura devem satisfazer a inequação 3.69, que informa que a potência do acoplamento não deve superar a potência do motor, mas é associada a definição da constante de torque eletromecânica τ_m , vide equação 3.70. Finalmente, determina-se a taxa de aquecimento, vide equação 3.71, que é um parâmetro muito considerado recentemente, e que define um critério para seleção de atuadores.

$$P_{cat} \geq P_a \tag{3.69}$$

$$\tau_m \Delta R \frac{J_m}{K_t^2} \tag{3.70}$$

$$\dot{A} = \frac{P_a}{\tau_m} = \frac{\tilde{T}_m^2}{J_m} \tag{3.71}$$

3.4.4.1 Estimação do Torque Eficaz

Para a determinação das perdas por efeito joule é necessário o conhecimento do torque eficaz, conseqüentemente, partindo da definição do valor eficaz e da expressão de torque estabelecida pela equação 3.18 chega se a

$$\tilde{T}_m^2 = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} T_m^2(t) dt = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \left[J_m(N\ddot{q}_k) + B_m(N\dot{q}_k) + T_{fm} + \frac{T_{in} + T_{vis} + T_{pk}}{\eta N} \right]^2 dt \quad (3.72)$$

Aplicando-se a propriedade distributiva da multiplicação e em seguida a propriedade distributiva da integração de funções para o quadrado do torque eficaz mostrado na equação 3.72, encontra-se a equação 3.73.

$$\tilde{T}_m^2 = A_k + B_k + C_k \quad (3.73)$$

onde

$$A_k = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \left[J_m^2(N^2\ddot{q}_k^2) + B_m^2(N^2\dot{q}_k^2) + \frac{T_{in}^2 + T_{vis}^2 + T_{pk}^2}{(\eta N)^2} \right] dt$$

$$B_k = \frac{2}{t_0} \int_0^{t_0} \left[J_m B_m N^2 \ddot{q}_k \dot{q}_k + J_m \ddot{q}_k \frac{T_{in} + T_{vis} + T_{pk}}{\eta} + B_m \dot{q}_k \frac{T_{in} + T_{vis} + T_{pk}}{\eta} \right] dt$$

$$C_k = \frac{2}{t_0} \int_0^{t_0} \left[\frac{T_{in} T_{vis} + T_{vis} T_{pk} + T_{pk} T_{in}}{(\eta N)^2} \right] dt$$

Mas se $\tilde{X}^2 = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} X^2(t) dt$ e $\bar{X} = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} X(t) dt$ representam valores eficazes e médios de um parâmetro genérico $x=x(t)$, conseqüentemente os valores A_k , B_k e C_k serão:

$$A_k = \left[J_m^2(N^2 \overline{\ddot{q}_k^2}) + B_m^2(N^2 \overline{\dot{q}_k^2}) + \frac{\overline{T_{in}^2} + \overline{T_{vis}^2} + \overline{T_{pk}^2}}{(\eta N)^2} \right]$$

$$B_k = \left[J_m B_m N^2 \overline{\ddot{q}_k \dot{q}_k} + J_m \frac{\overline{\ddot{q}_k T_{in}} + \overline{\ddot{q}_k T_{vis}} + \overline{\ddot{q}_k T_{pk}}}{\eta} + B_m \overline{\dot{q}_k \frac{T_{in} + T_{vis} + T_{pk}}{\eta}} \right] dt$$

$$C_k = \left[\frac{\overline{T_{in} T_{vis}} + \overline{T_{vis} T_{pk}} + \overline{T_{pk} T_{in}}}{(\eta N)^2} \right]$$

3.4.4.2 Estimação da Taxa de Redução Usando o Torque Eficaz

Com o objetivo de minimizar as perdas por aquecimento em função da taxa de redução N , deriva-se o quadrado do torque eficaz em função da taxa de redução e iguala-se a zero,

a) Para modelo de motor convencional, (comumente encontrado no mercado para aplicações robóticas).

$$\frac{\partial}{\partial N} \left[\tilde{T}_m^2 \right] = 0 \quad (3.74)$$

Isolando-se N obtido, conforme a equação 3.75, encontra-se a melhor taxa de redução N_a para que se tenha a menor perda por aquecimento possível. Duas raízes simétricas são encontradas, mas aquela com sinal negativo é desprezada porque não tem sentido falar em taxa de redução negativa, a menos que fosse um redutor que além de reduzir invertesse o sentido de rotação do motor.

$$N_a = \sqrt{\frac{\tilde{T}_{ck}}{\tilde{T}_{mc}}} \quad (3.75)$$

onde

$$\tilde{T}_{ck} = \sqrt{\tilde{T}_{in}^2 + \tilde{T}_{vis}^2 + \tilde{T}_{pk}^2 + 2[\overline{\tilde{T}_{in}\tilde{T}_{vis}} + \overline{\tilde{T}_{vis}\tilde{T}_{pk}} + \overline{\tilde{T}_{pk}\tilde{T}_{in}}]} \quad (3.76)$$

$$\tilde{T}_{mc} = \sqrt{J_m^2 \ddot{q}_k^2 + B_m^2 \dot{q}_k^2 + 2J_m B_m \overline{\ddot{q}_k \dot{q}_k}} \quad (3.77)$$

3.4.4.3 Verificação e Reorganização do Torque Eficaz

Reorganizando a equação 3.73 de torque eficaz em função da taxa de redução para torque eletromagnético eficaz ótimo, pode-se chegar à equação 3.78. Um procedimento análogo é desenvolvido a partir daqui determinando o torque eficaz para três condições, uma com carga generalizada e motores convencionais, e outras duas com motores ideais supondo no primeiro caso que a carga varia no tempo e no segundo caso que a carga é constante no tempo.

i) Motores Convencionais

$$\tilde{T}_m^2 = D_k + E_k + F_k \quad (3.78)$$

$$D_k = \tilde{T}_{mc}^2 N^2$$

$$E_k = \frac{2}{\eta} \left[J_m [\overline{\ddot{q}_k \tilde{T}_{in}} + \overline{\ddot{q}_k \tilde{T}_{vis}} + \overline{\ddot{q}_k \tilde{T}_{pk}}] + B_m [\overline{\dot{q}_k \tilde{T}_{in}} + \overline{\dot{q}_k \tilde{T}_{vis}} + \overline{\dot{q}_k \tilde{T}_{pk}}] \right] \quad (3.79)$$

$$F_k = \frac{\tilde{T}_{ck}^2}{[\eta N]^2}$$

Onde, se distinguem os termos \tilde{T}_{mc} , \tilde{T}_{ck} , e E_k definido como *off-set*, consequentemente:

$$\tilde{T}_m^2 = N^2 \tilde{T}_{mc}^2 + E_k + \frac{\tilde{T}_{ck}^2}{[\eta N]^2} \quad (3.80)$$

Multiplicando-se e dividindo-se a equação 3.80, por $A = 4 \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck} \eta$, e reorganizando a equação resultante isolando a taxa de redução ótima Na para atender as solicitações de aquecimento, o torque eletromagnético do motor pode ser finalmente, representado pela equação 3.81.

$$\tilde{T}_m^2 = \tilde{T}_{ca} f(N) = \tilde{T}_{ca} [h(N) + f_3] = \tilde{T}_{ca} h(N) + E_k \quad (3.81)$$

Estas últimas equações são definidas respectivamente em função do fator de *off-set* E_k , mostrado na equação 3.79; do fator de acoplamento $f(N)$, mostrado na equação 3.83; do torque de carga acoplada \tilde{T}_{ca} da equação 3.82; do grau de acoplamento $h(N)$, da equação 3.84, e do *off-set* da equação 3.85 do *off-set*, todos para taxa de aquecimento de acoplamento mínima.

$$\tilde{T}_{ca} = 2 \sqrt{\frac{\tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck}}{\eta}} \quad (3.82)$$

$$f(N) = h(N) + \frac{1}{4} f_3 = \frac{1}{4} \left[\left[\frac{N}{Na} \right]^2 + \left[\frac{Na}{N} \right]^2 + \frac{E_k}{\eta \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck}} \right] \quad (3.83)$$

$$h(N) = \frac{1}{4} \left[\left[\frac{N}{Na} \right]^2 + \left[\frac{Na}{N} \right]^2 \right] \quad (3.84)$$

$$f_3 = 2 \frac{E_k}{\eta \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck}} \quad (3.85)$$

ii) Motor Ideal e Inércia da Carga Variante

Nestes casos o torque virtual do motor se tornaria $\tilde{T}_{mc} = J_m \ddot{q}_k$. Assim, o torque eletromagnético de acoplamento \tilde{T}_{mc} ; o torque de carga acoplada \tilde{T}_{ca} ; o *off-set* E_k ; o fator de acoplamento para taxa de aquecimento mínimo $h(N)$; e o grau de acoplamento para taxa de aquecimento mínimo $f(N)$, e o fator f_{3i} passariam a ser representados, respectivamente, pelas equações 3.86, 3.87, 3.88, 3.89, 3.90 e 3.91.

$$\tilde{T}_m^2 = \tilde{T}_{ca}^2 f_i(N) = \tilde{T}_{ca}^2 h_i(N) + E_{ki} = \tilde{T}_{ca}^2 [h_i(N) + f_{3i}] \quad (3.86)$$

$$\tilde{T}_{ca} = 2\sqrt{\frac{J_m \tilde{q}_k \tilde{T}_{ck}}{\eta}} \quad (3.87)$$

$$E_{ki} = \frac{2J_m}{\eta} \left[\overline{\ddot{q}_k T_{in}} + \overline{\ddot{q}_k T_{vis}} + \overline{\ddot{q}_k T_{pk}} \right] \quad (3.88)$$

$$f_i(N) = h_i(N) + f_3 \quad (3.89)$$

$$h_i(N) = \frac{1}{4} \left[\left[\frac{N}{N_{ai}} \right]^2 + \left[\frac{N_{ai}}{N} \right]^2 \right] \quad (3.90)$$

$$f_{3i} = \frac{\eta E_{ki}}{\tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck}} \quad (3.91)$$

iii) Motores Ideais e Inércia da Carga Constante

Normalmente a influência das várias juntas da cadeia cinemática de um manipulador representam um carregamento variável para seu motor. Num projeto robótico deve-se desenvolver um robô cuja influência da carga seja constante, havendo uma compensação total de gravidade para os elos acionados e para a carga imposta pela tarefa deste manipulador em todo o tempo de realização da tarefa, o momento de inércia desta carga pode ser considerado constante, assim equações definidas nesta seção são validadas.

Sendo a inércia da carga considerada constante e representada por uma constante J_c , como é o caso estudado por [SHNEYDOR, 89], e que não é o caso típico de aplicações robóticas, amenos que for evidente a existência da compensação total de desequilíbrio dos elos em torno dos eixos das juntas, então o torque inercial de carga seria $\tilde{T}_{in} = J_c \tilde{q}_k$. Isto implicaria que $\overline{\ddot{q}_k T_{in}} = J_c \tilde{q}_k^2$. Com estas considerações, o torque eletromagnético de acoplamento \tilde{T}_{mc} ; o torque de carga acoplada \tilde{T}_{ca} ; o *off-set* E_k ; o fator de acoplamento para taxa de aquecimento mínimo $h(N)$; o grau de acoplamento para taxa de aquecimento mínimo $f(N)$, e o fator f_{3i} passariam a ser representados respectivamente pelas equações 3.92, 3.93, 3.95, 3.94 e 3.96.

$$\tilde{T}_m^2 = \tilde{T}_{ca}^2 f_{ii}(N) = \tilde{T}_{ca}^2 h_i(N) + E_{kii} = \tilde{T}_{ca}^2 [h_{ii}(N) + f_{3ii}] \quad (3.92)$$

$$E_{kii} = \frac{2J_m}{\eta} \left[J_c \tilde{q}_k^2 + \overline{\ddot{q}_k T_{vis}} + \overline{\ddot{q}_k T_{pk}} \right] \quad (3.93)$$

$$f_{ii}(N) = \left[h_{ii}(N) + \frac{1}{4} f_{3ii} \right] \quad (3.94)$$

$$h_{ii}(N) = \frac{1}{4} \left[\left[\frac{N}{N_{ai}} \right]^2 + \left[\frac{N_{ai}}{N} \right]^2 \right] \quad (3.95)$$

$$f_{3ii} = 2 \left[\frac{N_{inx}}{N_{ai}} + \frac{\bar{q}_k T_{vis} + \bar{q}_k T_{pk}}{\tilde{q}_c \tilde{T}_{ck}} \right] \quad (3.96)$$

O quadrado do torque eficaz equivalente, \tilde{T}_m^2 , fica assim determinado para estas três condições, entretanto ele não tem valor significativo isoladamente, só passa a ter importância quando atua como parâmetro para a determinação da taxa de aquecimento \dot{A} representada na equação 3.71. Entretanto, o fator de acoplamento $h_{ii}(N)$ e o grau de acoplamento $f_{ii}(N)$ são parâmetros preliminares importantes para a definição da taxa de aquecimento a qual é um parâmetro intermediário no processo de seleção.

As demonstrações deste item servem principalmente para mostrar que quando for adotadas as condições particulares impostas por [SHNEYDOR, 89], através deste equacionamento, obtém-se as mesmas respostas, validando a forma de equacionamento adotada aqui.

3.4.4.4 Análise da Taxa de Aquecimento

O objetivo aqui é determinar a taxa de aquecimento que depende das perdas P_a . Uma vez determinado o torque eletromagnético eficaz ao quadrado \tilde{T}_m^2 pelas equações 3.81, 3.86, 3.92, as perdas são determinadas para os três casos anteriores, através da equação 3.68. Entretanto será desenvolvida somente para os dois primeiros, uma vez que o último não se aplica aos modelos de manipulador estudados, tendo sido usado somente para ilustrar aquela condição típica dos estudos sobre escolha de motores para manipuladores.

Neste caso, o torque eletromagnético eficaz é definido na equação 3.81, assim as perdas equivalentes têm a forma da equação 3.97 e 3.98, onde P_{cat} , P_{ac} , e P_{ck} são respectivamente as perdas do motor, determinadas pelos parâmetros das condições ambientais e do motor, perdas da carga com acoplamento e perdas da carga independentes do acoplamento.

$$P_{cat} \geq P_{ac} = P_{ck} f(N) = P_{ck} \left[h(N) + \frac{f_3}{4} \right] \geq P_{ck} \quad (3.97)$$

$$P_{ck} \Delta \tau_m \frac{4}{J_m \eta} \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck} \quad (3.98)$$

Dividindo-se ambos os lados da expressão 3.97 por τ_m , obtém-se a taxa de aquecimento do acoplamento \dot{A}_{ac} para a tarefa e as condições estabelecidas, e que é função da taxa de aquecimento de carga independente do acoplamento \dot{A}_{ck} , dos fatores de acoplamento $f(N)$, do grau de

acoplamento $h(N)$ e do fator de *off-set* f_3 determinados, respectivamente, pelas equações 3.100 3.83 3.84 e 3.85.

$$\dot{A}_{cat} \geq \dot{A}_{ac} = \frac{P_{ac}}{\tau_m} = \frac{\tilde{T}_m^2}{J_m} = \dot{A}_{ck} f(N) = \dot{A}_{ck} \left[h(N) + \frac{f_3}{4} \right] \geq \dot{A}_{ck} \quad (3.99)$$

onde \dot{A}_{ck} é a taxa de potência de aquecimento da carga, dada por

$$\dot{A}_{ck} = \frac{4}{J_m \eta} \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck} \quad (3.100)$$

O motor pode suportar uma taxa de aquecimento máxima \dot{A}_{cat} , que é definida em função de parâmetros de catálogos do motor e das condições do meio ambiente, (conforme equação 3.101) onde $\Delta\theta = (\theta_{max} - \theta_{amb})$, é a diferença entre a temperatura máxima que o motor suporta dada em catálogos e a temperatura ambiente; R_θ é a resistência térmica da armadura do motor; τ_m é fornecida pela equação 3.70 que assume a forma:

$$\dot{A}_{cat} = \frac{P_{cat}}{\tau_m} = \frac{\Delta\theta}{R_\theta \tau_m} = \frac{(\theta_{max} - \theta_{amb}) K_t^2}{R_\theta R_a J_m} \quad (3.101)$$

Assim ficam estabelecidos dois critérios de seleção de atuadores baseados nas taxas de aquecimento que são ilustrados na figura 3.8, veja enunciados:

i) o primeiro é um critério condicional preliminar, baseado na definição dos extremos da inequação 3.99, e estabelece que se o motor não pode suportar uma taxa de aquecimento superior a taxa de aquecimento de carga livre de acoplamento \dot{A}_{ck} , ele não poderá atender a taxa de aquecimento para qualquer que seja o redutor empregado, logo deve ser descartado, e a busca por outro no catálogo deve continuar até o final, ou até que se encontre um que atenda as condições especificadas.

ii) o segundo critério é estabelecido genericamente pelo lado esquerdo da inequação 3.99, e somente deve ser verificado se o primeiro critério for atendido, e consiste em determinar o domínio, ou intervalo, no qual as taxas de acoplamento satisfazem tal desigualdade, veja na figura 3.8.

3.4.5 Relação Entre as Taxas de Potências e as Taxas de Aquecimento

Concordando com [SHNEYDOR, 89], e baseando-se nas equações 3.68 a 3.71 pode-se concluir que a taxa de aquecimento é proporcional ao quadrado da corrente eficaz

$$\dot{A} \propto \tilde{I}_{max}^2 \quad (3.102)$$

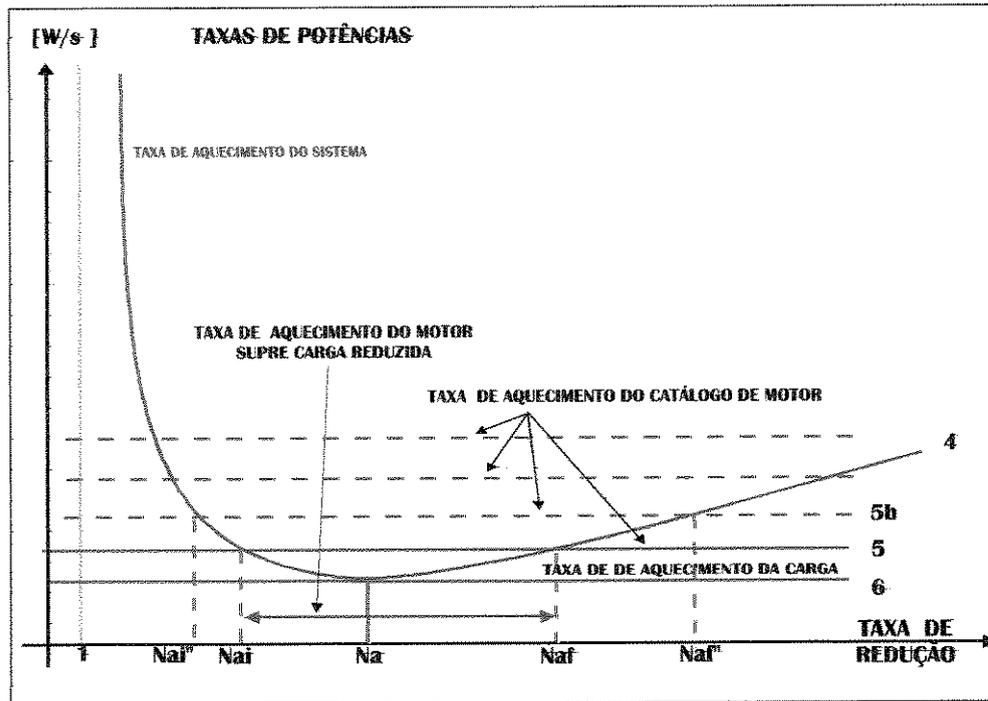


Figura 3.8: Limitações das taxas de acoplamento em função das taxas de aquecimentos

Por definição sabe-se também que o torque eletromagnético produzido pelo motor de corrente contínua é igual ao produto da sua constante ou sensibilidade de torque pela corrente de armadura, isto vale também para os valores de pico que determinam a expressão abaixo. Pela equação 3.36 pode-se concluir também, que a taxa de potência é proporcional ao quadrado da corrente de pico deste tipo de motor.

$$\dot{P} \propto I_p^2 \tag{3.103}$$

No caso específico da carga usada por [SHNEYDOR, 89], a corrente de pico do motor tem intensidade de três a dez vezes maior que corrente eficaz máxima. No caso da junta robótica usada aqui, as simulações mostraram que o torque de pico variou entre duas e três vezes o torque eficaz máximo.

$$2 \tilde{I}_{max} \leq I_p \leq 3 \tilde{I}_{max} \tag{3.104}$$

que conduzem a definição a seguir;

$$4 \tilde{I}_{max}^2 \leq I_p^2 \leq 9 \tilde{I}_{max}^2 \Rightarrow 4 \dot{A}_p \leq \dot{P}_p \leq 9 \dot{A}_p \Rightarrow \tag{3.105}$$

Logo, pode-se concluir que a taxa de potência do motor deve ser muito maior que a taxa de aquecimento.

$$\dot{P}_M \gg \dot{A}_p \text{ ou genericamente } \dot{P} \gg \dot{A} \quad (3.106)$$

3.4.5.1 Análise Térmica para Especificação de Atuadores em Regime Transitório

O comportamento térmico do motor, veja [SHNEYDOR, 89], pode ser descrito pela equação 3.107 que é de simplificada e de primeira ordem, que trata este motor como um sistema trocador de calor análogo a um circuito elétrico, onde as perdas P_a que são produzidas pelo efeito joule da corrente elétrica circulando na resistência da armadura, é a fonte geradora de calor, que causa uma diferença de temperatura $\Delta\theta$ entre o enrolamento do motor e o ambiente, produzindo um fluxo de calor que circula através dos materiais dos enrolamentos, da carcaça e do núcleo que comportam como impedâncias térmicas definidas em função da resistência térmica ao fluxo de calor para o ambiente R_θ e da capacidade térmica C do motor.

$$\Delta\theta + CR_\theta\dot{\Delta\theta} = P_a R_\theta \quad (3.107)$$

Assim pode-se definir uma constante térmica

$$\tau_\theta \triangleq CR_\theta \quad (3.108)$$

logo

$$\Delta\theta + \tau_\theta\dot{\Delta\theta} = P_a R_\theta \quad (3.109)$$

Se o sistema se equilibrar em regime permanente, não haverá mais variação da diferença de temperatura θ com o ambiente, ou seja $\frac{d(\Delta\theta)}{dt} = \dot{\Delta\theta} = 0$. Neste caso as perdas na armadura P_a passa a valer o valor específico P_{ac} , conforme a equação 3.110.

$$\Delta\theta_{max} = P_{ac} R_\theta \quad (3.110)$$

Dividindo-se ambos os lados da equação 3.110 por $R_\theta\tau_m$ e comparando com a equação 3.99, à taxa de potência adquire também agora a forma da equação 3.111, que é análoga àquela forma apresentada pela equação 3.101.

$$\frac{\Delta\theta_{max}}{R_\theta\tau_m} = \frac{P_{ac}}{\tau_m} \triangleq \dot{A}_{ac} \quad (3.111)$$

Assumindo uma hipótese mais desfavorável, isto é, que a energia total das perdas durante a operação seja dada por

$$E = \int_0^{t_f} Ri_M^2(t)dt = \int_0^{t_f} \frac{R}{K_t^2} T_M^2(t)dt \quad (3.112)$$

Considerando ainda que a contribuição da taxa de variação de temperatura seja dada pela razão entre a energia total e a capacidade térmica, então

$$\Delta\theta_{max} = \frac{E_{max}}{C} \Rightarrow E_{max} = C\Delta\theta_{max} \quad (3.113)$$

Para uma operação regular, e assumindo que R seja constante, a equação 3.112 torna-se

$$E = t_f \frac{R}{K_t^2} \tilde{T}_M^2 \quad (3.114)$$

Entretanto, a energia máxima não deve exceder a energia estimada, ou seja,

$$E_{max} \geq E \quad (3.115)$$

Substituindo as equações 3.113 e 3.114 em 3.115 tem-se;

$$C\Delta\theta_{max} \geq t_f \frac{R}{K_t^2} \tilde{T}_M^2 \quad (3.116)$$

Substituindo-se a igualdade $P_{ac} = R \frac{\tilde{T}_M^2}{K_t^2}$ que por analogia é semelhante a forma mostrada na equação 3.68 na definição equação 3.99 tem-se

$$\dot{A}_{ac} = \frac{R \tilde{T}_M^2}{K_t^2 \tau_m} \quad (3.117)$$

Reorganizando a equação 3.108, obtém-se $R_\theta = \frac{\tau_\theta}{C}$, que ao ser substituindo em 3.111 define a

$$\frac{\Delta\theta_{max}}{R_\theta \tau_m} = \frac{C \Delta\theta_{max}}{\tau_\theta \tau_m} = \dot{A}_{ac} \Rightarrow C \Delta\theta_{max} = \tau_\theta \tau_m \dot{A}_{ac} \quad (3.118)$$

Ao mesmo tempo, sabendo-se que o motor se sobreaquece, podendo se destruir com o calor gerado internamente quando a taxa de potência do acoplamento supera a taxa de potência do motor, ou seja $\dot{A}_{cat} \geq \dot{A}_{ac}$, baseado na equação 3.118, pode-se obter também a seguinte inequação,

$$\tau_{\theta}\tau_m\dot{A}_{cat} \geq \tau_{\theta}\tau_m\dot{A}_{ac} \quad (3.119)$$

Dividindo-se ambos os lados por $t_f T_m$ pode-se, finalmente obter a inequação 3.120.

$$\dot{A}_{cat} \geq \frac{\tau_f}{\tau_{\theta}} \dot{A}_{ac} \quad (3.120)$$

Conforme o modelo de motor usado pode-se ter dois equacionamentos para o regime de operação transitória do motor. Para motores convencionais, onde a viscosidade não é desprezível, a taxa de potência de acoplamento é definida pela equação 3.99. Substituindo-se esta equação na equação 3.120, encontra-se a equação 3.121, que garantem que se certifique que os respectivos modelos de motores satisfaçam as condições de carga e acoplamento em regime transitório para cada junta do manipulador.

i) Modelo de motor convencional

$$\dot{A}_{cat} \geq \frac{\tau_f}{\tau_{\theta}} \dot{A}_{ck} f(N) = \dot{A}_{cc} f(N) \geq \dot{A}_{cc} \quad (3.121)$$

onde $\dot{A}_{ck} = \frac{4}{J_m \eta} \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck}$

3.4.6 Análise do Aquecimento Usando Notação Simplificada

O desenvolvimento matemático empregado aqui será o mesmo que anteriormente, mas empregando uma notação ou um modelo genérico da carga e do motor, portanto, simplificando o modelo de representação do torque eletromagnético do motor para evidenciar a taxa de redução.

3.4.7 Estimando o Quadrado do Torque Eficaz Sobre o Motor

Esta seção propõe uma análise genérica dos parâmetros de aquecimento do motor acionando uma junta robótica, a começar pela aplicação do valor eficaz na equação de torque determinada na equação 3.19, cuja resposta é apresentada na equação 3.122, sendo que $\tilde{X}^2 = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} X^2(t) dt$ e $\bar{X} = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} X(t) dt$ representam os valores eficaz e médio do parâmetro $x=x(t)$.

$$\tilde{T}_m^2 = N^2 \tilde{T}_{mc}^2 + \frac{\tilde{T}_{ck}^2}{[\eta N]^2} + 2 \frac{\overline{T_{mc} T_{ck}}}{\eta} \quad (3.122)$$

Comparando-se com a equação 3.79 pode-se concluir que o termo $E_2 = 2 \frac{\overline{T_{mc} T_{ck}}}{\eta}$ é o dobro da média do produto do torque virtual do motor pelo torque da carga.

3.4.7.1 Estimando a Taxa de Redução para Quadrado Torque Eficaz

Objetivando minimizar as perdas por aquecimento representadas pela taxa de aquecimento \dot{A} em função da taxa de redução N , deve-se derivar o quadrado do torque eficaz do motor, que é o parâmetro dependente desta taxa de redução conforme equação 3.71. Igualando-se esta derivada a zero e isolando-se o N assim obtido, encontra-se a melhor taxa de redução para que se tenha a menor perda por aquecimento. Duas raízes são encontradas, e a negativa é desprezada porque não tem sentido falar em taxa de redução negativa, a menos que seja um redutor que inverte a rotação do motor.

$$\frac{\partial}{\partial N} \left[\tilde{T}_m^2 \right] = 0 = 2N \tilde{T}_{mc}^2 + 2 \frac{\tilde{T}_{ck}^2}{\eta^2 N^3} \quad (3.123)$$

Assim a taxa de acoplamento para que a taxa de aquecimento do acoplamento seja minimizada é definida na equação 3.124, para a qual vale o comentário que precede a equação 3.74.

$$N_a = \sqrt{\frac{\tilde{T}_{ck}}{\tilde{T}_{mc}}} \quad (3.124)$$

3.4.7.2 Análise do Aquecimento pelo Torque Eficaz

Através de uma análise crítica da equação 3.123, pode-se evidenciar a taxa de redução para que se tenha a mínima taxa de aquecimento através deste acoplamento, enquanto N_a fica conhecido através da equação 3.124. O quadrado do torque eficaz pode ser modificado pela multiplicação e divisão do lado direito da equação 3.122 pela constante $k = 4 \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck} \eta$, seguido de uma reorganização que a coloca na forma mostrada na equação 3.125.

$$\tilde{T}_m^2 = \frac{4}{\eta} \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck} f(N) \quad (3.125)$$

$$f(N) = h(N) + \frac{1}{4} f_3, \quad (3.126)$$

$$f_3 = \frac{\eta \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck}}{\tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck}} \quad (3.127)$$

$$h(N) = \frac{1}{4} \left[\left[\frac{N}{N_a} \right]^2 + \left[\frac{N_a}{N} \right]^2 \right] \quad (3.128)$$

A equação 3.125 pode assumir também a forma $\tilde{T}_m^2 = \tilde{T}_m^2(N) = \frac{4}{\eta} \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck} h(N) + \frac{2}{\eta} \overline{T_{mc} T_{ck}}$. Seu valor mínimo é o torque de carga que é determinado para uma taxa de redução ótima N_{as} definindo a equação 3.124. Para garantir que o torque eficaz, calculado para a carga, $\tilde{T}_c^2 = \tilde{T}_m^2(N_{as})$ para qualquer que seja a taxa de acoplamento do redutor de velocidade adotado, não seja superior ao torque máximo do motor estabelecido em catálogo \tilde{T}_{cat}^2 , que garante que o motor está apto à realização de tarefa. Os atuadores devem seguir a regra estabelecida pela inequação 3.129. A partir da solução desta equação encontra-se o domínio da taxa de redução.

$$\tilde{T}_{cat}^2 \leq \tilde{T}_m^2(N_{as}) \leq \tilde{T}_c^2 = \frac{2J_m}{\eta} [\tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck} + \overline{T_{mc} T_{ck}}] \quad (3.129)$$

$$\text{onde } f(N_{as}) = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \frac{\eta \overline{T_{mc} T_{ck}}}{\tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck}} \quad (3.130)$$

$$\text{onde } f_i(N) = h_i(N) + \frac{1}{4} f_{3i}, \quad (3.131)$$

$$f_{3i} = 2 \frac{\eta \overline{T_{ck} T_{mc}}}{\tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck}} \quad (3.132)$$

$$h_i(N) = \frac{1}{4} \left[\left[\frac{N}{N_{ai}} \right]^2 + \left[\frac{N_{ai}}{N} \right]^2 \right] \quad (3.133)$$

3.4.7.3 Especificação através da Análise da Taxa de Aquecimento

Neste item limitar-se-á a análise do modelo genérico para motor convencional. O primeiro passo é determinar as perdas Pa no motor, usando-se as equações 3.68 e 3.71, mais a constante de tempo eletromecânico do motor τ_m , dada pela equação 3.70, e o torque do motor \tilde{T}_m^2 fornecido pela equação 3.125, como mostrado a seguir.

$$Pa = \frac{\tau_m}{J_m} \tilde{T}_m^2 f(N) = P_c f(N) = P_c \left[h_s(N) + \frac{f_3}{4} \right] \quad (3.134)$$

onde a potência de carga máxima é, $P_c \triangleq \frac{\tau_m}{J_m} \frac{4}{\eta} \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck}$.

Dividindo-se a expressão 3.134 por τ_m , obtém-se a taxa de aquecimento do acoplamento \dot{A}_{ac} .

$$\dot{A}_{ac} = \frac{Pa}{\tau_m} = \frac{\tilde{T}_m^2}{J_m} = \dot{A}_{ck} f(N) = \dot{A}_{ck} \left[h(N) + \frac{f_3}{4} \right] \quad (3.135)$$

onde \dot{A}_{ck} é a taxa de potência de aquecimento da carga fornecida a seguir.

$$\dot{A}_{ck} \Delta \frac{P_{ck}}{\tau_m} = \frac{4}{\eta} \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck} \quad (3.136)$$

Assim, para que um redutor atenda as condições da junta e sistema acionado, a taxa de aquecimento do acoplamento \dot{A}_{ac} , deve ter um intervalo de tal forma que seja superada pela taxa de aquecimento do motor \dot{A}_{cat} , ver equação 3.101, determinada com base no ambiente de operação e parâmetros do motor fornecidos pelo fabricante através dos catálogos. Isto garante que haja redutores capazes de atuar como acopladores, por isto a solução desta inequação fornece a faixa de redutores que atende as necessidades do acoplamento.

$$\dot{A}_{cat} \geq \dot{A}_{ac} \geq \dot{A}_{ck} \quad (3.137)$$

A taxa de aquecimento provocada pela carga \dot{A}_{ck} , é a máxima taxa de aquecimento que a carga pode produzir durante o período de execução da tarefa, de tal forma que seja a mínima taxa de acoplamento, se \dot{A}_{cat} não for superior a \dot{A}_{ck} , pode-se dizer que não existe acoplamento que impeça o sobreaquecimento do motor, logo, ele deve ser descartado, e um novo motor deve ser buscado na lista. Assim o motor e o acoplamento devem satisfazer as condições estabelecidas na inequação 3.137.

3.4.8 Investigação da Capacidade de Carga do Motor para Variáveis Discretas

Toda a análise matemática feita até aqui, é suficiente para representar os critérios de seleção de atuadores usados nesta tese. Na análise do processo de seleção de motores de robôs as funções foram consideradas para tempo de amostragem contínuo $f(t)$, e havia uma constante k pertencente ao espaço ψ das funções em tempo de amostragem contínuo. Como na prática, a análise que se faz visa trabalhar com parâmetros que variam em função do tempo, e considerando que as operações realizadas e as funções determinadas ocorrem em sistemas digitais, isto exige a preparação das funções que são amostradas para serem analisadas discretamente através do tempo, o que deve ser precedido pela elaboração prévia de algumas considerações e condições analíticas básicas.

Na análise usando amostragem discreta, existe uma função correspondente a $f(t)$ definida para amostragem contínua, e que tem forma $f(\sum \Delta t(i)) = f(i)$, onde $\Delta t(i)$ é a variação do tempo entre uma amostra e outra, ambas pertencentes ao espaço Ψ das funções definidas para amostragem discreta.

Considerando que para o espaço Ψ , aplicado ao processo de seleção de motores para robôs, tem-se funções múltiplas $g(i)$ e $f(i)$ tal que as variações de amostragem $\Delta t(i) = \Delta t$ serão constantes e simultâneas para todas as funções, e que o período da amostragem total é dado por T , então para este estudo ficam valendo as seguintes propriedades aritméticas para Ψ .

$$\text{I) O valor médio de } f(i) \text{ é dado por } \overline{F} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{np} f(i) \Delta t(i). \quad (3.138)$$

$$\text{II) O valor eficaz de } f(i) \text{ é dado por } \tilde{F} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^{np} f^2(i) \Delta t(i)}. \quad (3.139)$$

$$\text{III) } \sum_{i=1}^{np} [K_t f(i)] = K_t \sum_{i=1}^{np} [f(i)] \quad (3.140)$$

$$\text{IV) } \sqrt{f(i) \cdot g(i)} = \sqrt{f(i)} \cdot \sqrt{g(i)} \quad (3.141)$$

$$\text{V) } \sqrt{\frac{f(i)}{g(i)}} = \frac{\sqrt{f(i)}}{\sqrt{g(i)}} \quad (3.142)$$

$$\text{VI) de I, III tem-se, } \overline{F \cdot G} = \frac{\Delta t(i)}{T} \sum_{i=1}^{np} f(i) \cdot f(i) \quad (3.143)$$

$$\text{VII) considerando } [f(i)g(i)]^2 = f(i)^2 g(i)^2 \quad (3.144)$$

$$\text{VIII) de II, III, IV tem-se } \tilde{F} \tilde{G} = \sqrt{\frac{\Delta t(i)}{T} \sum_{i=1}^{np} f^2(i) g^2(i)}. \quad (3.145)$$

$$\text{IX) de II, III e V tem-se } \frac{\tilde{F}}{\tilde{G}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{np} f^2(i)}{\sum_{i=1}^{np} g^2(i)}} \quad (3.146)$$

3.4.8.1 Considerações sobre o Torque do Motor

Da mesma forma que o máximo torque eletromagnético do motor de uma junta robótica foi determinado na equação 3.42 para sistemas com variáveis contínuas, chega-se na equação 3.147 para sistemas usando variáveis discretas.

Neste caso, x é a ordem da ocorrência da amostragem que indica o maior torque de carga. Este valor de torque é obtido pela iteração de i começando de 1 até a última amostragem np . No início da iteração, um valor nulo é arquivado numa variável tp que deve reservar os valores de torque máximos durante as iterações, e a variável ix contém o valor da amostragem da iteração ocorrida, cujo valor de torque absoluto encontrado é superior ao contido em tp , então, tp assume o valor de torque e ix assume o valor da iteração.

No final deste processo iterativo, tem-se o ponto exato, ou iteração, na qual ocorreu o torque de pico. Assim, como cada variável é guardada numa lista que contém todas as amostragens do processo, ficam conhecidos todos os valores de parâmetros e variáveis para que se tenha o maior torque de carga. Substituindo-se estes valores na equação 3.147, pode-se determinar o valor da taxa de redução que equivalente ao mínimo torque de acoplamento, que fica estabelecido quando ocorre o máximo torque de carga.

Neste caso, os parâmetros usados na determinação do torque de carga máximo, T_{in} , T_{vis} , T_{pk} , N , T_m , \ddot{q} , \dot{q} , T_{pk} , T_{mc} , d_{kk} , c_{ijk} ou T_{ck} , que são apresentados na equação 3.42, para sistema com variável contínua, agora considerando-se o sistema com variáveis discretas assumem os respectivos valores, $\max(T_{nx})$, $\max(T_{vis})$, $\max(T_{pk})$, $\max(N)$, $\max(T_m)$, $\max(\ddot{q}_k)$, $\max(\dot{q}_k)$, $\max(T_{in})$, $\max(T_{vis})$, $\max(T_{pk})$, $\max(T_{mc})$, $\max(d_{kk})$, $\max(c_{ijk})$ ou $\max(T_{ck})$.

Com estas representações, as equações 3.20 a 3.22 tornam-se respectivamente as equações 3.147 a 3.149 para variáveis discretas. Onde $\max()$, determina o maior valor das amostragens do parâmetro desejado, ou seja, o valor de pico. Isto é feito através do programa de seleção de atuadores ASELATUM para os modelos de seleção JECA, TIVE, e GERAL.

Nos três casos ilustrados pelas equações seguintes, os valores dos torques de pico do motor foram superestimados, com base na expectativa de que os máximos valores dos parâmetros ocorrem simultaneamente.

i) Modelo TIVE

$$T_{mp} = J_m N \max(\ddot{q}_k) + B_m N \max(\dot{q}_k) + \frac{\max(T_{in}) + \max(T_{vis}) + \max(T_{ck})}{\eta N} \quad (3.147)$$

ii) Modelo SHNEY

$$T_{mp} = J_m (N \max(\ddot{q}_k)) + B_m (N \max(\dot{q}_k)) + \frac{\max(T_{in}) + \max(T_{evk})}{\eta N} \quad (3.148)$$

iii) Modelo GERAL

$$T_{mp} = N \max(T_{mc}) + \frac{\max(T_{ck})}{\eta N} \quad (3.149)$$

iv) Modelo SIMUL

Para a modelo SIMUL, entretanto, os valores do torque eletromagnético de pico para o motor carregado são determinados pela simulação cinemática e dinâmica do manipulador, usando um motor previamente selecionado. Com base nos perfis obtidos pela simulação do sistema, o torque de pico assume valores para cada tempo de amostragem, e os parâmetros da equação 3.150

são obtidos exatamente quando o torque eletromagnético resultante do motor, atinge seu valor máximo, então inicia-se os testes para verificar se este motor é capaz de desempenhar as funções requeridas pela junta do manipulador no processo de seleção.

$$T_{mp} = NT_{mc}(ix) + \frac{T_{ck}(ix)}{\eta N} = J_m N \ddot{q}_k(ix) + B_m \dot{q}_k(ix) + \frac{T_{in}(ix) + T_{vis}(ix) + T_{ek}(ix)}{\eta N} \quad (3.150)$$

3.4.8.2 Determinação das Taxas de Reduções ou Acoplamento

Caso seja adotada a análise genérica, o motor com o melhor torque de pico será obtido quando o lado direito das equações 3.147 a 3.149, for o mínimo possível em função da taxa de redução. Procedendo de forma análoga àquela usada para determinar o parâmetros usando variáveis contínuas, a taxa de redução para os casos mais genéricos será.

i) Modelo GERAL

$$N_c = \sqrt{\frac{\max(T_{ck})}{\eta \max(T_{mc})}} \quad (3.151)$$

ii) Modelo SHNEY

$$N_c = \sqrt{\frac{\max(T_{in}) + \max(T_{ekv})}{\eta [J_m \max(\ddot{q}_k) + B_m \max(\dot{q}_k)]}} \quad (3.152)$$

onde $\max(T_{evp}) = \max(T_{vis} + T_{ek})$

iii) Modelo TIVE

$$N_c = \sqrt{\frac{\max(T_{in}) + \max(T_{vis}) + \max(T_{pk})}{\eta [J_m \max(\ddot{q}_k) + B_m \max(\dot{q}_k)]}} \quad (3.153)$$

iv) Modelo JECA (Utilizando parâmetros cinemáticos)

$$N_c = \sqrt{\frac{\max(d_{kk}) \max(\ddot{q}_k) + \max(c_{ijk}(q\dot{q})) \max(\dot{q}_k) + \max(T_{pk})}{\eta [J_m \max(\ddot{q}_k) + B_m \max(\dot{q}_k)]}} \quad (3.154)$$

Os casos descritos nas últimas quatro equações, correspondem ao método da estimação. Usando-se o método da simulação, independente do tipo do modelo da carga, a taxa de acoplamento ou redução assume as formas indicadas nas equações 3.155 e 3.156.

v) Modelo SIMUL-TIVE (Utilizando parâmetros dinâmicos)

$$N(ix) = \sqrt{\frac{T_{in}(ix) + T_{vis}(ix) + T_{pk}(ix)}{\eta [J_m \ddot{q}_k(ix) + B_m \dot{q}_k(ix)]}} \quad (3.155)$$

vi) Modelo SIMUL ou SIMUL-GERAL

$$N(ix) = \sqrt{\frac{T_{ck}(ix)}{\eta T_{mc}(ix)}} \quad (3.156)$$

3.4.8.3 Reorganização do Torque do Motor em Função da Taxa de Redução

Reorganizando-se a equação 3.149 em função da taxa de redução ótima 3.151,

$$T_{mp} = 2\sqrt{\frac{\max(T_{cm})\max(T_{ck})}{\eta}} G(N, ip) \quad (3.157)$$

$$G(N, ip) = \frac{1}{2} \left[\frac{Nc}{N} + \frac{N}{Nc} \right] \quad (3.158)$$

onde $G(N,ip)$ é o grau de acoplamento entre a carga e o motor através do redutor.

A primeira condição limite do motor é a taxa de potência de carga T_c que é determinada pela equação da taxa de potência do motor, a qual depende da taxa de redução escolhida quando a taxa de redução N for determinada pelo menor torque de motor, e para a qual o grau de acoplamento é $G(N, ip) = 1$. O motor não pode ser incapaz de acionar a junta neste ponto crítico. Se ele for capaz de acioná-la ali, poderá acioná-la nas demais condições previstas, $T_c \leq T_{mp}$. Por isto a equação 3.159 é muito importante para a averiguação preliminar do motor, uma vez que estabelece o primeiro parâmetro que relaciona este motor à carga, o torque máximo do motor desacoplado.

$$\max(T_c) = 2\sqrt{\frac{\max(T_{cm})\max(T_{ck})}{\eta}} \quad (3.159)$$

Este valor máximo é gerado quando conhecemos o perfil discreto das variáveis que compõem o produto $\max(T_{cm})\max(T_{ck})$, assim iteramos o perfil do produto no tempo e reservamos o valor máximo simultaneamente com o estado das demais variáveis no instante correspondente àquela iteração, assim se conhece $T_m(ix)$, $\ddot{q}_k(ix)$, $\dot{q}_k(ix)$, $T_{mc}(ix)$, $T_{ck}(ix)$, e por último $N(ix)$ cujo cálculo deve ser baseado nas expressões 3.155 e 3.156. Observando-se estas duas equações, verifica-se que o denominador $T_{m_{ix}}$, nunca deve ser nulo, evitando que $N(ix)$ adquira proporções infinitas, o que é improvável em função da não existência de motores com torque nulo no eixo, além do fato de que esta análise é realizada para a condição de torque de carga máxima.

3.4.8.4 Análise das Taxas de Potência

A taxa de potência é definida como $\dot{P} = T_m^2/J_m$, vide equação 3.99. A aplicação desta regra, nas equações 3.157, permite a determinação das taxas de potência de acoplamento e de carga para as três condições estudadas nos itens anteriores.

Com base na equação 3.99 e 3.157, a taxa de potência do acoplamento é \dot{P}_{ac} e a taxa de potência da carga da junta \dot{P}_{ck} assumem a forma da equação 3.160, e esta última taxa de potência ocorre quando a taxa de acoplamento é $N = N_c$. A taxa de potência do acoplamento obtida é função também do fator de acoplamento $G_2(N, ip)$, conforme equação 3.158, e vale no mínimo 1 quando $N = N_c$.

$$\dot{P}_{ac}(N) = \dot{P}_{ck}G_2(N, ip) \text{ onde } \dot{P}_{ck} = 4 \frac{\max(T_{cm})\max(T_{ck})}{J_m\eta} \quad (3.160)$$

Uma vez conhecida a taxa de potência máxima do motor pleiteado para a junta, obtida diretamente do catálogo, fica fácil especificá-lo para que seja capaz de realizar os esforços exigidos naquela junta para aquela tarefa.

Determinadas as últimas expressões e de posse de um catálogo, agora fica fácil determinar um motor para cada junta tal que o manipulador tenha capacidade de realizar a tarefa desejada. O catálogo do motor especifica sua taxa de potência \dot{P}_{cat} , então é importante que este valor seja inicialmente superior à taxa de potência de carga \dot{P}_c determinada pela equação 3.160, depois é necessário determinar a taxa de redução de tal forma que a taxa de potência do motor não seja superior à taxa que o motor suporta, $\dot{P}_{mp} = \dot{P}_{cat}$, isto é feito iterando a taxa de redução em torno de N_i até que seja encontrado o limite no qual esta taxa de redução exija uma taxa de potência do motor inferior àquela constante obtida do catálogo. Quando isto acontecer, pela verificação da inequação 3.161, estarão determinados os limites de taxa de redução para este motor, respectivamente modelo genérico e com torque mecânico puramente inercial.

i) Motor Convencional usando Estimção

$$\dot{P}_{cat} \geq \dot{P}_{mp}(N)G^2(N, ip) \geq \dot{P}_c \quad (3.161)$$

3.4.8.5 Resultado da Especificação do Motor pelas Taxas de Potências

Em termos computacionais os perfis de aceleração, velocidade e torque de carga que são obtidos através modelagem dinâmica da carga e da simulação da cinemática do robô para satisfazer as condições impostas pela tarefa requerida. Assim calcula-se o torque eficaz máximo ideal com o seu acoplamento para evitar o aquecimento do motor usando a inequação 3.129, para tal, determina-se o valor máximo da média dos produtos $\overline{T_{mc}T_{ck}}$ e para estes casos, segue equação

3.124, que os produtos $\tilde{T}_{mc}\tilde{T}_{ck}$ não devem ser nulos para o produto médio máximo, logo \tilde{T}_{ck} nem \tilde{T}_{mc} devem ser individualmente nulos.

Considerando que o processo é discreto, e levando-se em consideração as propriedades determinadas acima, pode-se rescrever as equações 3.129 a 3.133, valendo-se das regras para amostragem discreta definidas nas equações 3.138 a 3.146.

3.4.9 Investigação do Aquecimento dos Atuadores para Variáveis Discretas

As regras para esta análise são aquelas estabelecidas para a especificação do motor pela análise da taxa de potência usando amostragem discreta.

3.4.9.1 A Taxa de Redução

A análise para a determinação da taxa de redução para este caso conduz à equação descrita a seguir.

$$N_a(i) = \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^{np} T_{ck}^2(i)}{\eta^2 \sum_{i=1}^{np} T_{mc}^2(i)}} \Rightarrow T_{mc}(i) \neq 0 \quad (3.162)$$

3.4.9.2 Considerações sobre o Torque Eficaz

Analogamente ao caso anterior, teremos que as equações 3.125 e 3.128, agora na notação simplificada tornam-se representadas, respectivamente, pelas equações 3.163 a 3.166, a seguir.

$$\tilde{T}_m^2(i) = \frac{4}{\eta} \sqrt{\frac{\Delta t(i)}{T} \sum_{i=1}^{np} T_{mc}^2(i) T_{ck}^2(i) f(N, i)} \quad (3.163)$$

$$f(N, i) = h(N, i) + \frac{1}{4} f_3(i), \quad (3.164)$$

$$f_3(i) = 2 \frac{\sum_{i=1}^{np} T_{mc}(i) T_{ck}(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{np} T_{mc}^2(i) T_{ck}^2(i)}} \quad (3.165)$$

$$h(N, i) = \frac{1}{4} \left[\left[\frac{N a(i)}{N} \right]^2 + \left[\frac{N}{N a(i)} \right]^2 \right] \quad (3.166)$$

Para a condição especial na qual o produto dos troques assume o valor mínimo, a taxa de acoplamento é $N = N a(i)$, e o grau de acoplamento para aquecimento mínimo torna-se mínimo

quando seu valor é $h(Na(i), i) = 1/2$, desta forma o torque do motor para o acoplamento usado na equação 3.163 assume a forma mostrada a seguir, que é chamada de torque de carga independente do acoplamento.

$$\tilde{T}_c^2(i) = \frac{2}{\eta} \left[\frac{\Delta t(i)}{T} \sqrt{\sum_{i=1}^{np} T_{mc}^2(i) T_{ck}^2(i)} + \sum_{i=1}^{np} T_{mc}(i) T_{ck}(i) \right] \quad (3.167)$$

Recorrendo ao catálogo encontra-se \tilde{T}_{cat}^2 que é determinado pela equação 3.101, depois determina-se o termo $\tilde{T}_{ac}^2(N, i)$ mostrado na inequação 3.168 que também é definido na equação 3.167, assim fica estabelecida a determinação da faixa de taxas de redução que satisfaz as condições de aquecimento para motor com a carga. O redutor cuja taxa de redução se encontrar nesta faixa, pode então ser escolhido.

$$\tilde{T}_{cat}^2 \leq \tilde{T}_{ac}^2(N, i) \leq \tilde{T}_{ck}^2(N, i) \quad (3.168)$$

3.4.9.3 Análise da Taxa de Aquecimento

A definição do equacionamento usando a taxa de aquecimento para sistema com variáveis discretas, vide equação 3.169, fornece um resultado análogo ao obtido para os sistemas de variáveis contínuas, equação 3.135.

$$\dot{A}_{ac} = \frac{P_c}{\tau_m} = \frac{\tilde{T}_m^2}{J_m} = \dot{A}_{ck} f(N, i) = \dot{A}_{ck} \left[h(N, i) + \frac{f_3(i)}{4} \right] \quad (3.169)$$

A equação 3.169, que representa a taxa de aquecimento do acoplamento para sistemas discretos, é composta pelos parâmetros \tilde{T}_m^2 , $f(N, i)$, $h(N, i)$ e $f_3(i)$, que são estabelecidos respectivamente pelas equações 3.163 a 3.166. A substituição destes elementos na equação 3.169, tem como resultado a seguinte equação:

$$\dot{A}_{ac}(i) = \frac{4}{\eta J_m} \frac{\Delta t(i)}{T} \sqrt{\sum_{i=1}^{np} T_{mc}^2(i) T_{ck}^2(i)} h(N, i) + \frac{2}{\eta J_m} \frac{\Delta t(i)}{T} \sum_{i=1}^{np} T_{mc}(i) T_{ck}(i) \quad (3.170)$$

O valor mínimo que esta função pode atingir é a taxa de carga independente do acoplamento, ou seja:

$$\dot{A}_{ck}(i) = \frac{2}{\eta J_m} \left[\frac{\Delta t(i)}{T} \sqrt{\sum_{i=1}^{np} T_{mc}^2(i) T_{ck}^2(i)} + \frac{\Delta t(i)}{T} \sum_{i=1}^{np} T_{mc}(i) T_{ck}(i) \right] \quad (3.171)$$

Analogamente a determinação das equações das taxas de aquecimento para acoplamento da equação 3.170 e das taxas de aquecimento para carga independente de acoplamento (vide equação 3.171) para atuadores genéricos, pode-se encontrar, respectivamente, as equações descritas abaixo para motores ideais.

$$\dot{A}_{ac}(ii) = \frac{4}{\eta} \frac{\Delta t(i)}{T} \sqrt{\sum_{i=1}^{np} \ddot{q}_k^2(i) T_{ck}^2(i) f(N, i)} + \frac{2}{\eta} \frac{\Delta t(i)}{T} \sum_{i=1}^{np} \ddot{q}_k(i) T_{ck}(i) \quad (3.172)$$

$$\dot{A}_{ck}(ii) = \frac{2J_m}{\eta} \left[\frac{\Delta t(i)}{T} \sqrt{\sum_{i=1}^{np} \ddot{q}_k^2(i) T_{ck}^2(i)} + \frac{\Delta t(i)}{T} \sum_{i=1}^{np} \ddot{q}_k(i) T_{ck}(i) \right] \quad (3.173)$$

Recorrendo ao catálogo encontra-se \dot{A}_{cat} obtida indiretamente através da equação 3.101. Recorrendo-se a análise feita até aqui encontra-se a taxa de aquecimento da carga que é determinada pela equação 3.171 ou 3.173, e a partir das equações da taxa de aquecimento do motor em função da taxa de redução dada pela equação 3.170 ou 3.172, determina-se os últimos elementos das inequações relacionadas com os limites dos torques 3.174 e 3.175, que permitem a obtenção da taxa de redução que satisfaz as condições de aquecimento do motor devido a carga.

$$\tilde{T}_{cat}^2 \geq \tilde{T}_m^2(i) \geq \tilde{T}_c^2(i) \quad (3.174)$$

$$\dot{A}_{cat} \geq \dot{A}_{ac}(i) \geq \dot{A}_{ck}(i) \quad (3.175)$$

3.4.10 Análise do Consumo Energético da Junta

Alguns estudos sobre balanceamento energético tem sido publicado atualmente em [PALHARES, 94], [DC MOTORS, 73]; e [TRZYNADLOWSKI, 88]. Nos artigos [DC MOTORS, 73] e [TRZYNADLOWSKI, 88] são apresentados outros procedimentos de análise energética direcionado para sistemas com movimentos incrementais, considerando o torque e a velocidade média do dispositivo acionado constante. Nestes estudos, feitos para sistemas invariantes no tempo, são calculados redutores ótimos para acoplamento motor-carga. [DC MOTORS, 73] exemplifica esta aplicação não somente para transmissões e redutores com engrenagens, mas também para sistemas polia-correia, e fuso-guia, que servem de redutores e para converter movimento rotacional em translacional.

A máxima energia dissipada num certo intervalo de tempo t_f , pode ser obtida do catálogo pelo produto entre a potência máxima do motor e o tempo de ação, ver equação 3.176. A equação 3.177 define a energia. Aplicando-se ao caso particular de um motor de corrente contínua e imã permanente, onde a tensão é o produto da corrente pela resistência $V = Ri$ e que a corrente i pode ser dada pela razão entre torque eletromagnético do motor e sua constante de torque K_t ,

considerando que $\tilde{x}^2 \triangleq 1/t_f \int_0^{t_f} x^2 dt$ e $\bar{x} \triangleq 1/t_f \int_0^{t_f} x dt$, representam, respectivamente, os valores eficaz e médio de uma função genérica $x = x(t)$ para variáveis contínuas.

$$W_m \triangleq V_p I_p t_f = R_a I_p^2 t_f \quad (3.176)$$

$$W_m \triangleq \int_0^{t_f} V_p I_p dt = \int_0^{t_f} R_a I_p^2 dt = \int_0^{t_f} R_a (T_p/K_t)^2 dt \quad (3.177)$$

A expressão do torque eficaz do motor, conforme o tipo de acionamento da junta, é determinada com base numa das equações 3.11 até 3.15, substituídas na equação 3.177. Assim quando a expressão do torque de acionamento não envolve taxa de redução, como mostrado nas equações 3.11, 3.14 e 3.15, a energia pode ser determinada imediatamente. Entretanto, se existe um redutor envolvido, sua taxa de redução N tornar-se uma incógnita, como mostra a equação 3.178, podendo se tornar mais um critério para a determinação da faixa de taxa de acoplamento.

$$W_m = \frac{R_a}{K_t^2} t_f \left[n^2 \tilde{T}_{mc}^2 + \frac{\tilde{T}_{ck}^2}{(n\eta)^2} + \frac{T_{ck} T_{mc}}{(n\eta)} \right] \quad (3.178)$$

Comparando-se a energia dissipada apresentada na equação 3.178, com a taxa de aquecimento resultante da substituição da equação 3.122 na equação 3.71, encontra-se a relação da energia dissipada com a taxa de aquecimento, mostrada na equação 3.179.

$$W_m = \frac{R_a J_m}{K_t^2} t_f \dot{A} = \tau_m t_f \dot{A} \quad (3.179)$$

3.4.11 Determinação do Redutor, Considerando Diversos Critérios

Até o presente momento foram determinados os domínios da taxa de redução para acoplamentos baseadas nos diversos parâmetros do motor, tais como taxas de potência e aquecimento.

A figura 3.9, ilustra os limites das taxas de acoplamentos impostos pelos critérios da taxa de potência, taxa de aquecimento e cinemática da carga, que também foram individualmente ilustrados respectivamente pelas figuras 3.5, 3.8 e 3.7 e cujas respostas são definidas pelas linhas paralelas ao eixo horizontal indicadas com letras maiúsculas, que são definidos pelas interseções condições apresentadas pelas seguintes curvas numeradas:

curva 1 - \dot{P}_{ac} , Taxa de potência do acoplamento: só haverá solução para o problema quando houver um trecho desta curva abaixo da curva 2.

curva 2 - \dot{P}_{cat} , Taxa de potência do motor: retirada dos catálogos de motores, é a máxima suportável pelo motor.

curva 3 - \dot{P}_{ck} , Taxa de potência de carga: que deve ser a mínima taxa de potência do acoplamento, e se o nível desta curva não for inferior a curva 2, não haverá solução para o problema, e se deverá reiniciar o processo de procura de motor e acoplamento.

curva 4 - \dot{A}_{ac} , Taxa de aquecimento do acoplamento entre o motor e a carga: só haverá solução para o problema quando houver um trecho desta curva abaixo da curva 4. Segue notação definida neste capítulo, especificada conforme o regime de operação, ou seja permanente ou transitório.

curva 5 - \dot{A}_{cat} , Taxa de aquecimento do motor: é a quantidade de calor máxima que ele pode suportar sem se sobreaquecer. Deve ser dada ou calculada baseada em parâmetros fornecidos pelo fabricante, através do catálogo e das condições do ambiente.

curva 6 - \dot{A}_{ck} , Taxa de aquecimento de carga: é a mínima carga que o motor pode sustentar através do acoplamento, e se ela não for superior a taxa de aquecimento do motor, é porque não haverá solução para o problema, e portanto se deve descartar este motor e reiniciar o processo de procura de outro motor e sistema de acoplamento.

curva 7 - Razão dos picos de velocidade entre carga referida ao lado do motor e velocidade do motor: é um limite acima do qual não há uma garantia de boa solução para o conjunto, e determina a taxa de acoplamento que garante que a velocidade imposta pelo motor seja suficiente para acionar a carga na velocidade exigida pelo sistema, através do acoplamento.

curva 8 - Razão dos picos de acelerações entre carga e motor: tem função análoga a do item anterior, mas com respeito a aceleração.

curva 5b - \dot{P}_{ac} , Taxa de aquecimento máximo do motor: que muda se houver refrigeração forçada (ver Catálogo do motor), ou conforme a temperatura ambiente

A - Resposta ao critério da taxa de potência

$$N \in sol_A \Rightarrow [N_{c(i)} \leq N \leq N_{c(f)}] \quad (3.180)$$

B - Resposta ao critério da taxa de aquecimento

$$N \in sol_B \Rightarrow [N_{a(i)} \leq N \leq N_{a(f)}] \quad (3.181)$$

ou se houver refrigeração forçada

$$N \in sol_{B^n} \Rightarrow [N_{a^n(i)} \leq N \leq N_{a^n(f)}] \quad (3.182)$$

C - Resposta à interseção dos critérios das taxas

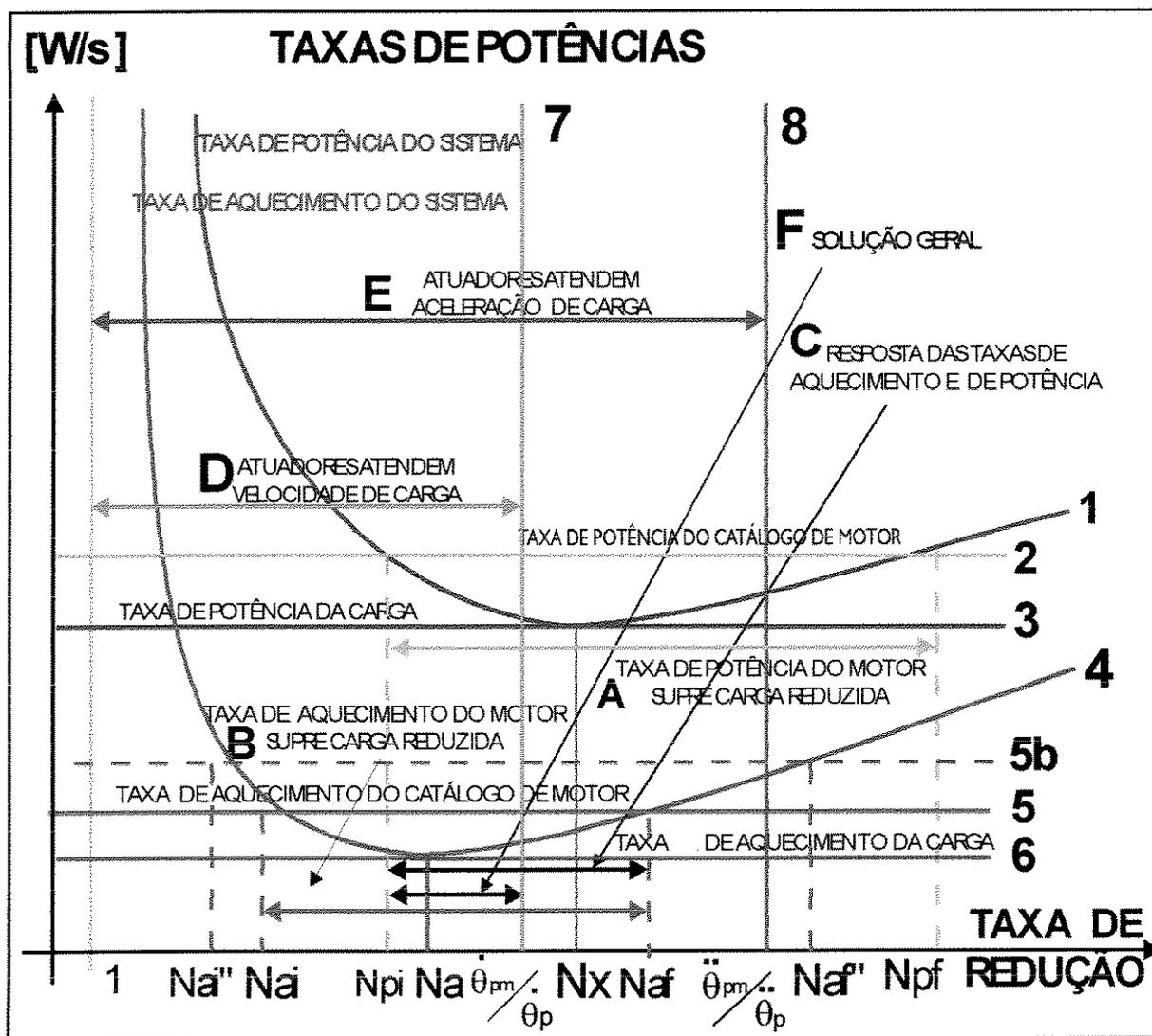


Figura 3.9: Seleção do Redutor pelos Critérios das Taxas de Potência, Velocidade e Aceleração.

$$sol_C \Rightarrow N \in (sol_A \cap (sol_B \vee sol_{B''})) \quad (3.183)$$

D - Resposta ao critério das velocidades

$$sol_D \Rightarrow 1 \leq N \leq \frac{\dot{\theta}_{pm}}{\dot{\theta}_p} \quad (3.184)$$

E - Resposta ao critério das acelerações

$$sol_E \Rightarrow 1 \leq N \leq \frac{\ddot{\theta}_{pm}}{\ddot{\theta}_p} \quad (3.185)$$

F - Solução geral, (interseção da projeção de todas as respostas acima no eixo da taxa de redução)

$$sol_F \Rightarrow N \in (sol_C \cap sol_D \cap sol_E) \quad (3.186)$$

Uma vez conhecida a faixa de taxa de redução que satisfaz as condições de carga das respectivas juntas do manipulador, parte-se para a escolha de uma taxa definida naquele domínio, que poderia se dar por uma razão técnica ou não. Neste trabalho, houve pouca preocupação com um refinamento ou um método para se chegar á melhor taxa de acoplamento do intervalo definido pela equação 3.186 dentro do qual todos as taxas de acoplamento são capazes de cumprir a função exigida pela tarefa, talvez seja um interessante caminho para futuras pesquisas. Na verdade o critério para escolha com maior folga, e que foi adotado aqui é matemático, e define a taxa de redução pelo **valor inteiro mais próximo da média entre o valor mínimo e o valor máximo daquela faixa**. Entretanto, pode-se optar pelos **limites inferiores ou superiores da faixa**, ou pode ser por **aquele cuja taxa de aquecimento é mínima ou cuja taxa de potência de carga é mínima**, ou poderia ser pela **média entre dois destes valores quaisquer entre estes** como indicado pelas expressões da taxa de redução N , enumeradas a seguir, desde que estes valores pertençam ao domínio estabelecido pela equação 3.186, conforme ilustrado na figura 3.9.

- i) $N = Nf$ taxa de redução final do domínio,
- ii) $N = Ni$ taxa de redução inicial do domínio,
- iii) $N = Na$ taxa de redução para taxa de aquecimento mínima,
- iv) $N = Np$ taxa de redução para taxa de potência de carga mínima,
- v) $N = (Nf + Ni)/2$ média entre os valores dos itens (i) e (ii),
- vi) $N = (Nf + Na)/2$ média entre os valores dos itens (i) e (iii),
- vii) $N = (Nf + Np)/2$ média entre os valores dos itens (i) e (iv),

viii) $N = (Np + Na)/2$ média entre os valores dos itens (i) e (ii),ou

ix) $N = (Nf + No + Np + Na)/4$ média entre os valores dos itens (i), (ii), (iii) e (iv),

Determinado um valor específico da taxa de redução ou acoplamento em cada junta, do redutor, parte-se para a determinação dos parâmetros de acionamento, amplificação e controle dos motores de cada junta (tais como corrente elétrica e tensões necessárias). Isto deve ser feito levando-se em conta o aquecimento dos motores. Sabe-se que a **corrente elétrica** em cada motor (definida nas equações 3.224) é determinada pela razão entre o **torque total**, (mostrado na equação 3.222 que engloba, torque de carga, e de atrito, inércia, e viscosidade do motor e da junta), e a **constante ou sensibilidade de torque do motor**.

3.5 Escolha de Motores de Corrente Contínua para Juntas com Acionamento não Reduzido

Uma junta é do tipo não reduzida quanto o tipo de sistema de acoplamento é indireto por transmissão, ou direto. O acionamento ou acoplamento indireto não reduzido é o tipo de acionamento indireto usado para simples transmissão de energia, sem redução da velocidade, mas como constitui uma carga para o sistema, pode representar uma certa perda por dissipação mecânica interna. Por isto o modelo do sistema de acionamento indireto por transmissão cuja taxa de redução é unitária, é mais genérico que o modelo do sistema de acionamento direto, pois considera o rendimento da transmissão η no modelo da carga, considerando que o acréscimo de carga introduzida, é proporcional a mesma.

$$\eta = \frac{T_{ck}}{T_{ck} + T_{trans.}} \Rightarrow T_{carga} = T_{ck} + T_{trans.} = \frac{T_{ck}}{\eta} \quad (3.187)$$

3.5.1 Investigação da Capacidade de Carga do Motor para os Critérios Diversos

No caso de um motor acionar a junta diretamente ou através de uma transmissão, seu modelo básico é aquele representado respectivamente pelas equações 3.11 e 3.11, onde o torque da junta acionada, ou torque de carga, T_{carga} , pode ser qualquer um daqueles mostrados pelas equações 3.5 a 3.8, conforme a complexidade exigida.

O modelo mais genérico para representar a condição proposta neste item, é o da equação 3.14, que se torna igual ao outro cujo rendimento vale 1. Assim conforme o modelo da carga, os modelos específicos para cada uma dos modelos discutidos anteriormente, se tornam representadas pelas equações 3.188 a 3.191. Em termos de motor e carga a equação 3.188 é a mais generalizada. Nestes casos o processo de seleção de atuador é simplificado por não haver necessidade de calcular a taxa de redução, nem fator de acoplamento e quanto ao uso do acionamento direto, basta substituir

o rendimento por 1, nas equações abaixo e nos demais passos seguintes do processo especificação de motores.

i) Modelo GERAL

$$T_m = T_{mc} + \frac{T_{total}}{\eta} \quad (3.188)$$

ii) Modelo JECA

$$T_m = J_m \ddot{q}_m + B_m \dot{q}_m + T_{fm} + \frac{d_{kk} \ddot{q}_k + c_{ijk}(q\dot{q})\dot{q}_k + T_{pk}}{\eta} \quad (3.189)$$

iii) Modelo TIVE

$$T_m = J_m \ddot{q}_m + B_m \dot{q}_m + T_{fm} + \frac{T_{in} + T_{vis} + T_{pk}}{\eta} \quad (3.190)$$

iv) Modelo SHNEY

$$T_m = J_m \ddot{q}_m + B_m \dot{q}_m + T_{fm} + \frac{T_{in} + T_{ekv}}{\eta} \quad (3.191)$$

3.5.1.1 Estimação do Torque de Pico Máximo Requerido pela Carga, Visto pelo Motor

Para especificação do motor para uma junta robótica acionada indiretamente, é considerado por [SHNEYDOR, 89] que o torque eletromagnético de pico do motor é no máximo igual valor calculado para a soma de todos os picos de torques componentes, como eles ocorressem simultaneamente, o que não é necessariamente a verdade. Assim pode-se afirmar que o torque de pico apresentado no catálogo pelo projetista do motor, deve ser superior a este torque para que se tenha garantia de que este motor possa acionar esta junta em qualquer situação presumida. Todavia, posteriormente, a partir da simulação cinemática e dinâmica do manipulador para acionamento da junta nas condições especificadas, pode-se conhecer o perfil dinâmico provável para este torque usando-se os parâmetros do motor pleiteado, conhecendo com boa precisão o torque máximo.

Da mesma forma que [SHNEYDOR, 89] procedeu para a especificação dos atuadores para juntas robótica com acionamento indireto, proceder-se-á para acionar uma junta robótica, porém agora contendo acionamento direto ou indireto com transmissão sem redução. Neste caso o torque de pico T_{cat} apresentado pelo catálogo do motor, deve ser superior ao torque eletromagnético T_{mp} de pico do motor determinado para as condições da tarefa desejada e pela estrutura do manipulador. Observando que daqui para frente o índice p indica os valores de pico do parâmetros ou variável.

Em termos de parâmetros cinemáticos, deve-se garantir que o torque motor retirado do seu catálogo seja superior ao torque motor calculado na inequação 3.192. E como o atrito nos motores é desprezível, o termo T_{fm} será omitido a partir daqui.

i) Modelo JECA

$$T_{cat} \geq T_{mp} = J_m \ddot{q}_{mp} + B_m \dot{q}_{mp} + \frac{d_{kk} \ddot{q}_{kp} + c_{ijk}(q\dot{q}) \dot{q}_{kp} + T_{ekp}}{\eta} \quad (3.192)$$

De uma forma genérica ele também pode ser representado pela inequação 3.193, que é mais simples e direta pois usa parâmetros do modelo dinâmico generalizado, pode-se ver que o cálculo preliminar do torque de pico da carga para estes dois tipos de acionamentos depende da **soma** dos torques do motor T_{mc} e do torque da carga T_{ck} , ao contrário do acionamento indireto, ver equação 3.31, que depende da raiz quadrada do **produto** do torque virtual do motor T_{mc} pelo torque de carga T_{ck} :

ii) Modelo GERAL

$$T_{cat} \geq T_{mp1} = T_{mcp} + \frac{T_{ckp}}{\eta} \quad (3.193)$$

iii) Modelo TIVE

$$T_{cat} \geq T_{mp2} = J_m \ddot{q}_{mp} + B_m \dot{q}_{mp} + \frac{T_{inp} + T_{ekvp}}{\eta} \quad (3.194)$$

iv) Modelo SHNEY

$$T_{cat} \geq T_{mp3} = J_m \ddot{q}_{mp} + B_m \dot{q}_{mp} + \frac{T_{inp} + T_{vip} + T_{pkp}}{\eta} \quad (3.195)$$

3.5.1.2 Simulação do Torque de Pico Máximo

Quando é possível simular as condições do manipulador, da tarefa e dos atuadores para a junta, pode-se determinar com precisão o torque de pico máximo para a carga. O ideal é quando o torque de pico máximo da carga pode ser determinado por simulação do modelo dinâmico, e quando ele é encontrado apresentará a forma abaixo onde o índice x indica o valor obtido para aquela variável simultaneamente quando se determina o torque de pico da junta. Neste caso o torque de pico é determinado pela equação 3.192, no caso do modelo SIMUL - JECA.

$$T_{cat} \geq T_{mx} = J_m \ddot{q}_{mx} + B_m \dot{q}_{mx} + \frac{d_{kkx} \ddot{q}_{kx} + c_{ijkx}(q\dot{q}) \dot{q}_{kx} + T_{ekx}}{\eta} = T_{mcx} + \frac{T_{ckx}}{\eta} \quad (3.196)$$

Na verdade o torque de pico máximo de carga tem a menor chance de ser o mínimo tanto quanto menor for o número de pico de termos usados na expressão, por isto a inequação $T_{cat} \geq T_{mp3} \geq T_{mp2} \geq T_{mp1} \geq T_{mp} \geq T_{mx} \Rightarrow T_{cat} \geq T_{mx}$ se torna ideal. Logo o melhor é determinar o pico da equação considerando todos os termos de uma vez determinando o torque de pico como um todo através da simulação, e para este torque de pico, seleciona-se os valores das demais variáveis e parâmetros indicados por um índice x.

3.5.1.3 Escolha do Motor por Estimação da Taxa de Potência

Nos catálogos de motores, o fornecimento da taxa de potência do motor. A taxa de potência máxima da carga pode ser usualmente representada por $\dot{P} = \frac{T_m^2}{J_m}$. Se a taxa de potência de catálogo do motor for superior a esta condição, o motor consegue acionar a carga, conseqüentemente é necessário que as demais condições como velocidade, aquecimento, e outros parâmetros sejam verificados para que seja confirmada a especificação deste motor. A taxa de potência é determinada pela elevação da inequação do torque de pico ótimo do motor ao quadrado dividido pela inércia do motor.

i) Modelo JECA

$$\dot{P}_{cat} \geq \frac{T_{mp3}^2}{J_m} = \frac{\left[J_m \ddot{q}_{mp} + B_m \dot{q}_{mp} + \frac{d_{kkp} \ddot{q}_{kp} + c_{ijkp} (\dot{q} \dot{q}) + T_{pkp}}{\eta} \right]^2}{J_m} \quad (3.197)$$

ii) Modelo TIVE

$$\dot{P}_{cat} \geq \frac{T_{mp2}^2}{J_m} = \frac{\left[J_m \ddot{q}_{mp} + B_m \dot{q}_{mp} + \frac{T_{inp} + T_{vip} + T_{pkp}}{\eta} \right]^2}{J_m} \quad (3.198)$$

iii) Modelo GERAL

$$\dot{P}_{cat} \geq \frac{T_{mp1}^2}{J_m} = \frac{\left[T_{mcp} + \frac{T_{ckp}}{\eta} \right]^2}{J_m} \quad (3.199)$$

3.5.1.4 Especificação de Motores pela Taxa de Potência Máxima, através das Simulação

No pior caso a potência de pico do sistema da junta pode assumir qualquer uma das formas mostradas nas equações 3.197 a 3.199, onde a taxa de potência determinada depende do número, de parcelas, uma vez que neste caso o torque de pico depende da soma dos valores de pico de cada parcela que compõe a equação do torque eletromagnético de pico, que deve ficar maior tanto quanto maior for o número de parcelas da equação.

O valor ótimo e mais próximo do pico real para o torque de pico é determinado, quando o modelo da dinâmico simulado (ver equação 3.200). Neste caso procura-se o valor de pico do torque resultante e não os valores de pico dos seus componentes.

Modelo SIMUL-JECA

$$\dot{P}_{cat} \geq \dot{P}_{mx} \geq \frac{T_{mp}^2}{J_m} = \frac{\left[J_m \ddot{q}_{mx} + B_m \dot{q}_{mx} + \frac{d_{kkx} \dot{q}_{kx} + c_{ijk} x(q\dot{q}) \dot{q}_{kx} + T_{pkx}}{\eta} \right]^2}{J_m} \quad (3.200)$$

Baseado nestas últimas equações pode-se construir uma inequação que revela o melhor modo de determinar o torque de carga máximo, menor valor possível, que é o caso onde a taxa de potência é determinada por simulação do torque de pico até encontrar o valor máximo, pois $T_{cat} \geq T_{mp3} \geq T_{mp2} \geq T_{mp1} \geq T_{mp} \geq T_{mx} \Rightarrow T_{cat} \geq T_{mx}$.

3.5.2 Condições Cinemáticas do Motor

Uma vez escolhido o motor, falta verificar se o motor escolhido atende as condições cinemáticas pré-determinadas, ou seja, se ele satisfaz as exigências das condições de carga para velocidade e aceleração de pico. Ou seja, é necessário que o motor seja capaz de impor as velocidades $max(\dot{q}_{kx})$ e acelerações $max(\ddot{q}_{kx})$ máximas requeridas para a junta, ou que elas sejam no máximo iguais as velocidades \dot{q}_{cat} e acelerações \ddot{q}_{cat} de pico apresentadas pelo catálogo do motor pleiteado.

Procedendo como na seção 3.4.3, onde as velocidades do motor, e das juntas, que no caso do acionamento indireto deveriam satisfazer as condições das inequações 3.59 e 3.61, pode-se ver no acionamento não reduzido que estes parâmetros devem satisfazer respectivamente as inequações 3.201 e 3.203, onde não deve aparecer a taxa de redução que ocorre no outro caso.

$$W_{kx} = W_c \leq W_p = W_o - \frac{RIp}{K_{te}} = W_o - \frac{RpTp}{K_{t}tpK_{te}} = W_{cat} \quad (3.201)$$

$$W_{cm} = W_{cx} = \left[W_o - \frac{RxIx}{K_{te}} \right] = \left[W_o - \frac{RxTx}{K_{t}txK_{te}} \right] \leq W_o = E_o/K_{te} \quad (3.202)$$

De uma forma geral, a velocidade de operação de um motor, independente de ele estar operando com carregamento máximo ou em vazio, é quase constante e geralmente fornecida pelo fabricante. Na escolha de um motor proposto para que este possa acionar diretamente junta de um manipulador lhe dando condições de executar uma determinada tarefa que lhe foi ou será imposta, deve ser verificado se a velocidade máxima \dot{q}_{ckp} e a aceleração máxima \ddot{q}_{ckp} impostas pelas condições de ambiente da junta e da tarefa não supera os limites de velocidades \dot{q}_{cat} e aceleração \ddot{q}_{cat} que este motor pode impor e que são retirados do catálogo do fabricante. Se isto não ocorrer, conforme

mostra a equação 3.203, este motor deve ser rejeitado imediatamente, e a investigação deve passar para um outro motor do catálogo a partir do qual todo o processo deve ser reiniciado.

$$\ddot{q}_{cat} \geq \ddot{q}_{ckp} \text{ e } \dot{q}_{cat} \geq \dot{q}_{ckp} \quad (3.203)$$

3.5.3 Análise da Especificação das Condições Térmicas do Motor

O princípio da análise térmica do motor para estes dois tipos de juntas é semelhante ao apresentado para uma junta com acionamento indireto reduzido, sendo baseado nas equações 3.188 a 3.192. Portanto, depende da determinação do torque eficaz da junta.

3.5.3.1 Cálculo do Torque Eficaz do Motor

O torque eficaz é determinado pela integral do quadrado do modelo de torque da junta em função do tempo, durante o período de execução da tarefa, determinado na equações 3.188 a 3.191, Neste trabalho a análise do torque eficaz será desenvolvida para dois modelos de cargas diferentes, o primeiro é baseado na equação 3.188 para o modelo GERAL e o segundo é baseado na equação 3.190 para o modelo TIVE.

ii) Modelo GERAL:

$$\tilde{T}_m^2 = \frac{1}{to} \int_0^{to} T_m^2(t) dt = \frac{1}{to} \int_0^{to} \left[T_{mc} + \frac{T_{ck}}{\eta} \right]^2 dt \quad (3.204)$$

Considerando que $\tilde{X}^2 = \frac{1}{to} \int_0^{to} X^2(t) dt$ e $\bar{X} = \frac{1}{to} \int_0^{to} X(t) dt$ representam valores eficaz e médio do parâmetro $x=x(t)$ a equação acima se torna.

$$\tilde{T}_m^2 = \tilde{T}_{mc}^2 + \frac{\tilde{T}_{ck}^2}{\eta^2} + 2 \frac{\overline{T_{mc} T_{ck}}}{\eta} \quad (3.205)$$

ii) Modelo TIVE:

$$\tilde{T}_m^2 = \frac{1}{to} \int_0^{to} T_m^2(t) dt = \frac{1}{to} \int_0^{to} \left[J_m(\ddot{q}_k) + B_m(\dot{q}_k) + T_{fm} + \frac{T_{in} + T_{vis} + T_{pk}}{\eta} \right]^2 dt \quad (3.206)$$

Aplicando a propriedade distributiva,

$$\tilde{T}_m^2 = A_k + B_k + C_k \quad (3.207)$$

$$A_k = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \left[J_m^2 (\ddot{q}_k^2) + B_m^2 (\dot{q}_k^2) + \frac{T_{in}^2 + T_{vis}^2 + T_{pk}^2}{(\eta)^2} \right] dt$$

$$B_k = \frac{2}{t_0} \int_0^{t_0} \left[J_m B_m \ddot{q}_k \dot{q}_k + J_m \ddot{q}_k \frac{T_{in} + T_{vis} + T_{pk}}{\eta} + B_m \dot{q}_k \frac{T_{in} + T_{vis} + T_{pk}}{\eta} \right] dt$$

$$C_k = \frac{2}{t_0} \int_0^{t_0} \left[\frac{T_{in} T_{vis} + T_{vis} T_{pk} + T_{pk} T_{in}}{(\eta)^2} \right] dt$$

Resolvendo-se as integrais, onde se $\tilde{X}^2 = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} X^2(t) dt$ e $\bar{X} = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} X(t) dt$ genericamente representam valores eficaz e médio de um parâmetro genérico $x=x(t)$, a equação acima se torna.

$$A_k = \left[J_m^2 (\tilde{q}_k^2) + B_m^2 (\bar{q}_k^2) + \frac{\tilde{T}_{in}^2 + \tilde{T}_{vis}^2 + \tilde{T}_{pk}^2}{\eta^2} \right]$$

$$B_k = \left[J_m B_m \overline{\ddot{q}_k \dot{q}_k} + J_m \frac{1}{\eta} [\overline{\ddot{q}_k T_{in}} + \overline{\ddot{q}_k T_{vis}} + \overline{\ddot{q}_k T_{pk}}] + B_m \dot{q}_k \frac{\overline{\dot{q}_k T_{in}} + \overline{\dot{q}_k T_{vis}} + \overline{\dot{q}_k T_{pk}}}{\eta} \right] dt$$

$$C_k = \left[\frac{\overline{T_{in} T_{vis}} + \overline{T_{vis} T_{pk}} + \overline{T_{pk} T_{in}}}{\eta^2} \right]$$

3.5.3.2 Análise da Taxa de Aquecimento

A taxa de aquecimento \dot{A}_{cat} máxima do motor é determinada através de parâmetros de catálogos do mesmo modo que para os motores de juntas com acionamento indireto reduzido (vide equações 3.101). A taxa de aquecimento de pico do motor apresentada pelo catálogo não pode ser superada pela taxa de aquecimento calculada para a junta (ou carga) para que não haja envelhecimento ou deterioração rápida do motor e de seus componentes.

A determinação da taxa de aquecimento da carga é baseada nas equações 3.68 a 3.71, onde \tilde{T}_m^2 é calculado através da equação pela equação 3.205 para um equacionamento genérico e 3.207 para um equacionamento detalhado da carga. Assim, os parâmetros do motor devem satisfazer as condições de aquecimento impostas pela junta com o motor e a carga na realização das tarefas definidas pelas inequações 3.208 e 3.209.

i) Modelo SIMUL-TIVE

$$\dot{A}_{cat} \geq \dot{A}_{ac} = \frac{A_k + B_k + C_k}{J_m} \quad (3.208)$$

ii) Modelo SIMUL-GERAL

$$\dot{A}_{cat} \geq \dot{A}_{ac} = \frac{\tilde{T}_{mc}^2 + \frac{\tilde{T}_{ck}^2}{\eta^2} + 2 \frac{\overline{T_{mc} T_{ck}}}{\eta}}{J_m} \quad (3.209)$$

3.5.4 Análise para Amostragem Discreta

A análise da especificação de motores para juntas robóticas acionadas diretamente ou indiretamente, sem redução através de transmissões de energia mecânica, deve-se considerar as mesmas propriedades usadas para a determinação do acionamento indireto reduzido que foram apresentadas na seção 3.4.8, através das equações 3.138 a 3.146. Neste caso, os valores de pico de uma determinada variável x serão dados por $x_p(i) = x = \text{Max}(x(i))$, onde o índice p representa o valor de pico e i o índice generalizado dos pontos de amostragens de uma variável x .

3.5.4.1 Considerações sobre o Torque de Pico Máximo de Carga

Sobre o torque de pico de carga, as notações empregadas, para amostragem discreta, seguem aquelas formas apresentadas no item 3.4.8.1.

a) Torque de Pico Máximo por Estimção

A determinação do torque de pico máximo por estimção com amostragem discreta é realizada pela determinação do torque mecânico máximo a partir do conhecimento do modelo invariante no tempo, e consiste em somar os valores máximos das contribuições dos torques do motor e da carga, (torques inerciais, de atrito, gravidade, próprios e de acoplamento com as demais juntas), que é uma aproximação válida e verdadeira, apesar de que este método da estimção superestima o valor dos torques de pico do motor, o que não ocorre no método da simulação que produz uma resposta mais precisa, como foi mostrado para o caso do acionamento indireto.

i) Modelo SIMUL-JECA:

$$T_{cat} \geq T_{mp} = J_m \max(\ddot{q}_m) + B_m \max(\dot{q}_m) + \frac{\max(d_{kk}) \max(\ddot{q}_k) + \max(c_{ijk}(q\dot{q})) \max(\dot{q}_k) + \max(T_{ek})}{\eta} \quad (3.210)$$

ii) Modelo SIMUL-SHNEY:

$$T_{cat} \geq T_{mp1} = \max(T_{mc}) + \frac{\max(T_{ck})}{\eta} \quad (3.211)$$

iii) Modelo SIMUL-GERAL:

$$T_{cat} \geq T_{mp2} = J_m \max(\ddot{q}_m) + B_m \max(\dot{q}_m) + \frac{\max(T_{in}) + \max(T_{ekv})}{\eta} \quad (3.212)$$

iv) Modelo SIMUL-TIVE:

$$T_{cat} \geq T_{mp3} = J_m \max(\ddot{q}_m) + B_m \max(\dot{q}_m) + \frac{\max(T_{inp}) + \max(T_{vi}) + \max(T_{pk})}{\eta} \quad (3.213)$$

b) Torque de Pico Máximo por Simulação

A análise do torque de pico máximo por simulação como o próprio nome indica, depende da simulação do modelo cujas funções variam no decorrer do tempo de execução da tarefa, e portanto oferece um resultado mais preciso do aquele do método da estimação que como foi afirmado no caso do acionamento indireto, superestima os valores de torque de pico que define um dos critérios de seleção de atuadores, independente da forma de representar o modelo da carga utilizado na determinação deste torque de pico, mas dependendo apenas da resolução ou variação do tempo de amostragem da simulação cinemática ou dinâmica. Neste caso (ix) é o índice da amostragem para a qual acontece o torque de pico.

i) Modelo SIMUL-JECA:

$$T_{cat} \geq T_m = J_m \ddot{q}_m(ix) \dot{q}_m(ix) + \frac{d_{kk}(ix) \ddot{q}_k(ix) + c_{ijk}(ix) (\dot{q}) \dot{q}_k(ix) + T_{ek}(ix)}{\eta} \quad (3.214)$$

ii) Modelo SIMUL-GERAL:

$$T_{mc}(ix) + \frac{T_{ck}(ix)}{\eta} \quad (3.215)$$

c) Considerações Sobre a Taxa de Potência do Motor

Neste item a taxa de potência do motor será definida, como anteriormente, pela razão entre o quadrado do torque de pico e a inércia do motor, assim, para cada um dos casos definidos anteriormente, ela será definida para o modelo GERAL primeiramente por estimação e a seguir por simulação:

i) Por Estimação

$$\dot{P}_{cat} \geq \dot{P}_{mp1} = \frac{\left[\max(T_{mc}) + \frac{\max(T_{ck})}{\eta} \right]^2}{J_m} = \frac{\max(T_{mc})^2}{J_m} + \frac{\max(T_{ck})^2}{\eta^2 J_m} + \frac{2}{\eta J_m} \max(T_{mc}) \max(T_{ck}) \quad (3.216)$$

ii) Por Simulação

$$\dot{P}_{cat} \geq \dot{P}_m = \frac{1}{J_m} \left[T_{mc}(ix) + \frac{T_{ck}(ix)}{\eta} \right]^2 = \frac{T_{mc}(ix)^2}{J_m} + \frac{T_{ck}(ix)^2}{\eta^2 J_m} + \frac{2}{\eta J_m} T_{mc}(ix) T_{ck}(ix) \quad (3.217)$$

Estas duas últimas inequações devem ser satisfeitas para que se tenha certeza de que o motor poderá acionar a carga em todas as condições de atividade e cargas previstas, conforme a tarefa e o projeto do manipulador.

d) Considerações sobre a Taxa de Aquecimento do Motor

A análise do torque de aquecimento feita aqui segue os princípios discutidos anteriormente, mas tem-se uma notação diferente por duas razões, a primeira é que a análise é feita para uma junta com acionamento direto, e a segunda é com amostragem de tempo discreto, tomando como base as regras para análise de amostragem discreta definidas pelas equações 3.138 a 3.146.

e) Considerações Sobre o Torque Eficaz

Como indicado pelas equações 3.68 a 3.71, a taxa de aquecimento é determinada em função do torque eficaz. No caso da amostragem discreta, o torque eficaz é determinado pela equação 3.218:

$$\tilde{T}_m^2(i) = \frac{\Delta t(i)}{T} \sqrt{\sum_{i=1}^{np} T_m^2(i) dt} = \frac{\Delta t(i)}{T} \sqrt{\sum_{i=1}^{np} \left[T_{mc}(i) + \frac{T_{ck}(i)}{\eta} \right]^2 dt} \quad (3.218)$$

$$\text{ou } \tilde{T}_m^2(i) = \frac{\Delta t(i)}{T} \sqrt{\sum_{i=1}^{np} \left[T_{mc}^2(i) + \frac{T_{ck}^2(i)}{\eta} + 2 \frac{T_{mc}(i)T_{ck}(i)}{\eta} \right] dt}$$

$$\tilde{T}_m^2(i) = T_{mc}^2(i) + \frac{\tilde{T}_{ck}^2(i)}{\eta^2} + 2 \frac{\overline{T_{mc}(i)T_{ck}(i)}}{\eta} \quad (3.219)$$

f) Análise da Taxa de Aquecimento

Aplicando o torque eficaz ao quadrado na definição de taxa de aquecimento, (vide equações 3.68 a 3.71), encontra-se a taxa de aquecimento, $\dot{A}_{ac} = \frac{R}{T_m} \frac{\tilde{T}_m^2}{K_t^2} = \frac{\tilde{T}_m^2}{J_m}$, conseqüentemente:

$$\dot{A}_{ac} = \frac{1}{J_m} \frac{\Delta t(i)}{T} \sqrt{\sum_{i=1}^{np} \left[T_{mc}^2(i) + \frac{T_{ck}^2(i)}{\eta} + 2 \frac{T_{mc}(i)T_{ck}(i)}{\eta} \right] dt} \quad (3.220)$$

$$\dot{A}_{ac} = \frac{1}{J_m} \tilde{T}_{mc}^2(i) + \frac{\tilde{T}_{ck}^2(i)}{\eta^2} + 2 \frac{\overline{T_{mc}(i)T_{ck}(i)}}{\eta} \quad (3.221)$$

Considerando-se a taxa de aquecimento do motor para as condições de carga, agora resta garantir-se, que ela não seja maior que a taxa de aquecimento suportável pelo motor, fornecida em catálogo, segundo a equação 3.101.

3.6 Determinação dos Parâmetros Terminais dos Motores

Os parâmetros terminais do motor, como perfis instantâneos de corrente, temperatura e velocidade de operação, tensão e corrente de desmagnetização que variam durante o intervalo de realização da tarefa, são determinados visando a validação do processo de seleção de atuadores antes que este seja encerrado incompleto. Estes parâmetros são determinados a partir, do conhecimento dos perfis de torques fornecidos pela equação 3.222 e perfis de velocidade instantânea definidos pela simulação cinemática do processo, e porque não dizer pela análise e teste da simulação do sistema do manipulador.

$$T_m = (J_m + d_{kk}/n_o)\ddot{q} + B_m\dot{q} + (T_{ekv} + T_f)/n_o = T_m + T_{ck}/n_o [Nm] \quad (3.222)$$

$$n_{co} = 9.5493\dot{q} [rpm] \quad (3.223)$$

A corrente de armadura é determinada diretamente pela razão entre o torque e sensibilidade ou constante de torque que é obtida através de catálogos, (vide equação 3.224).

$$i = \frac{T_m}{K_t} [A] \quad (3.224)$$

Os valores eficazes, por sua vez, são determinados pela razão entre a somatória do produto dos quadrados dos valores de cada amostra pela variação tempo de amostragem Δt_i , e o tempo de realização total da tarefa (t). As equações 3.225 e 3.226 mostram essas relações para torque e corrente;

$$\tilde{T} = 1/t_f \sqrt{\sum T_m^2 \Delta t_i} [Nm] \quad (3.225)$$

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{T}_m}{K_t} [A] \quad (3.226)$$

Uma vez estabelecida a corrente requerida pelo terminal do motor, deve-se verificar se ela realmente não ultrapassa os valores de pico estipulados para que aquele motor a suporte. Caso isto aconteça, segue-se em frente verificando as condições térmicas. O primeiro passo da análise térmica é a determinação do aumento da temperatura da rotor, até o regime permanente (ver equação 3.227, que é definida na seção 5.3.4 em [DC MOTORS, 73]) onde $(K_t \tilde{I} - \tilde{T}a)$ é a diferença entre os torques gerados internamente e o torque de saída do motor. Uma vez que a variação de temperatura na armadura é conhecida, pode-se determinar a temperatura da armadura somando esta variação com a temperatura ambiente conforme a equação 3.228.

$$\theta_r \Delta \frac{R_a \tilde{I} + 0.7395 n_o (K_t \tilde{I} - \tilde{T}_a) R_\theta}{1 - R_a \tilde{I} \psi_{cu} R_\theta} [^\circ C] \quad (3.227)$$

$$\theta_a = (\theta_{amb} + \theta_r) [^\circ C] \quad (3.228)$$

Com o aquecimento, a resistência do cobre da armadura R_a , varia assumindo o valor da equação 3.229 em regime permanente, onde $K_t e = K_t / 1, 3524 [V/rpm]$ é a constante de força contra-eletromotriz do catálogo do motor, e ψ_{cu} o coeficiente de temperatura do cobre, R_θ é a resistência térmica do motor, θ_{amb} é a temperatura ambiente do motor, θ_a é a temperatura ambiente da armadura do motor após a partida e até o regime permanente, θ_r é a variação da temperatura do motor após a partida e em regime permanente. Isto especifica o último parâmetro para determinação da tensão exigida pelos terminais do motor, para sustentar a junta na execução da tarefa do manipulador.

$$R_q = R_a (1 + \psi \theta_r) [\Omega] \quad (3.229)$$

$$V = (R_q I + k_e N n_{c_o}) [Volts] \quad (3.230)$$

Antes da escolha do motor, se tudo tiver dado certo até aqui, é bom verificar se a queda de velocidade no motor em função do torque requerido, não leva a uma extrapolação dos limites informados pelo fabricante. Para que isto seja garantido, a velocidade máxima em vazio do motor não deve ser inferior a soma da velocidade da carga mais a queda de velocidade devido ao torque em cada ponto da tarefa como mostra a equação 3.231.

$$n_{m_o} \geq \frac{R_q I}{N K_t e} + n_{c_o} = \frac{R_q T_m}{N K_t K_t e} + n_{c_o} [rad/s] \quad (3.231)$$

Uma vez que o perfil de tensão para a realização da tarefa pode ser determinado através da simulação dos parâmetros da equação 3.230, que é proporcional à velocidade que determina o termo predominante desta equação, ela pode ser utilizada para determinar o nível de **tensão referencial** que pode ser comparado com a tensão definida pela velocidade lida diretamente do motor através dos *encoders*, e os dois resultados assim definidos podem ser subtraídos definindo o erro entre as duas respostas o qual poderia ser considerado o sinal de controle da velocidade deste motor. Neste caso, a intensidade do erro detectado implicaria na geração de um nível de tensão que deveria compensar sua causa, o que poderia ser realizado através de um circuito *PWM* inversor. A integração, derivação e/ou não do erro para gerar o sinal de controle, define os chamados controladores do tipo integrativo, derivativo, proporcional, ou mistos, do tipo proporcional derivativo e proporcional integrativo, que podem ser eficientes para sistemas de até segunda ordem.

3.7 Programas Computacionais do Processo de Seleção de de Atuadores para Manipuladores

Com esta seção se encerra toda a análise matemática necessária para se efetuar o processo de seleção de atuadores via computador, por isto no restante deste capítulo serão realizados breves comentários sobre alguns dos programas computacionais mais importantes deste trabalho. E em seguida, a atenção será voltada para os dois programas relacionados diretamente com a seleção de atuadores para manipuladores, o ASELATUM, é o programa de coordenação geral do processo o SIGECOSAM. A descrição e comentários gerais sobre todos os programas são apresentadas no início desta tese.

3.7.1 ASELATUM - Algoritmos de Seleção de Atuadores para Manipuladores

Uma vez escolhida a estrutura de um elo e determinados os parâmetros das cargas acionadas por cada junta de um robô (que devem ser consolidados com a modelagem ou adaptações e remodelagem do manipulador, feitas após as definições das configurações de atuadores necessárias nas juntas posteriores, e que são determinadas conforme no capítulo 2), pode-se iniciar o processo de escolha de atuadores para cada junta específica.

O programa ASELATUM, cujo diagrama funcional geral é mostrado na figura 3.10 e fluxograma operacional é apresentado na figura A.4 do anexo A, é construído baseado nas análises apresentadas pelas demais seções que definem diversos critérios de seleção de motores e redutores neste capítulo, e por isto é o programa que efetiva a seleção de atuadores para cada junta. Ele é dividido em quatro níveis de programação importantes para seleção dos atuadores de uma junta robótica, que são: aquisição de parâmetros e variáveis do sistema; determinação e teste, parâmetros do motor e parâmetros básicos para o processo de seleção; determinação e teste de parâmetros intermediários do processo e definição e teste dos parâmetros terminais do motor.

3.7.1.1 Nível de Aquisição de Parâmetros e Variáveis do Sistema

Os parâmetros básicos da seleção de atuadores são informações que descrevem a estrutura do manipulador, seu ambiente de operação, forma e modo de execução da tarefa, e o comportamento cinemático das juntas. Estes parâmetros básicos são sensíveis a tarefa, tipo de manipulador, tipo de acionamento, massas e a distribuição dos atuadores das demais juntas, que ficam em elos de ordem superior do manipulador, e outros fatores como a compensação de equilíbrio de massas em torno dos eixos, (descrito no capítulo 2 e será validado no capítulo 4).

Estes dados são determinados no programa de apoio AAMMOVISA, e salvos em dois bancos de dados com padrão *MATHEMATICA_{TM}*, que são lidos no programa ASELATUM. O primeiro concentra os parâmetros característicos do manipulador, configurações dos atuadores, da tarefa, e ambiente de operação. O segundo concentra as amostragens dos perfis cinemáticos das

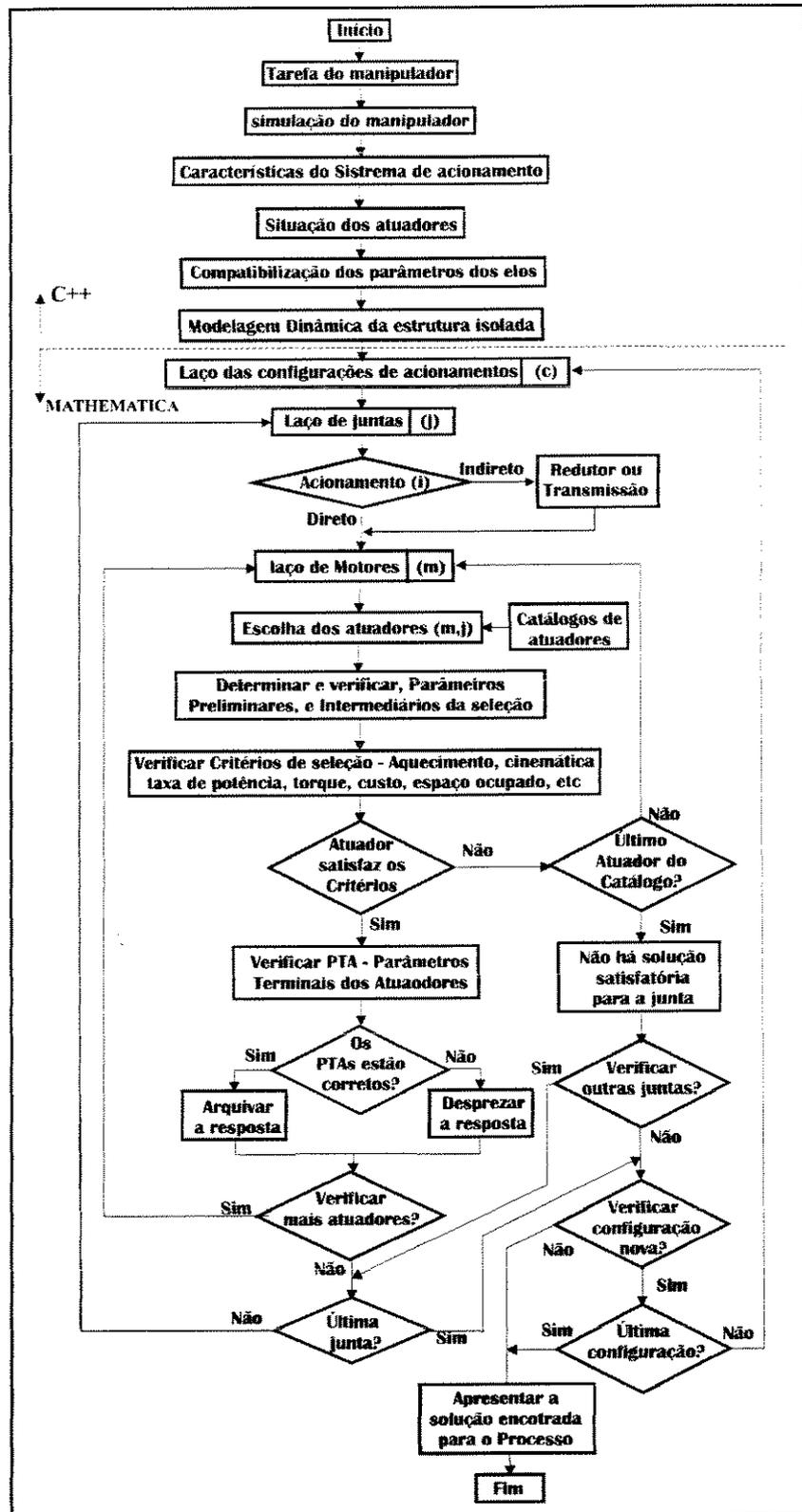


Figura 3.10: Diagrama funcional do ASELATUM

juntas obtidos através das simulações de execução da tarefa nas condições críticas, e o padrão de amostragem informa se ela é constante ou variável.

Uma vez contendo as informações do manipulador, equações dinâmicas determinadas pelo programa AMODIRO e as condições de operação e da tarefa, o programa ASELATUM itera os perfis de amostragem cinemática e define, para cada tempo de amostragem, o valor dos parâmetros dinâmicos das juntas para a estrutura isolada.

3.7.1.2 Nível de Determinação e Teste dos Parâmetros Básicos no Processo

Uma vez feita a modelagem, impostas as condições, dinâmicas e cinemáticas do manipulador, o processo de seleção parte do conhecimento de alguns parâmetros importantes relacionando motor, acoplamento e carga. Para isto ele busca os parâmetros dos atuadores, motores no arquivo CATMOT e redutores no arquivo CATRED.

Uma nova iteração das amostragens é executada, sendo determinados os torques virtual e eletromagnético máximos do motor, e simultaneamente, os valores médios e eficazes, dos parâmetros dinâmicos, tais como torque de carga, torque virtual do motor e torque eletromagnético máximo do motor, e os parâmetros cinemáticos da carga, como velocidade, e aceleração. Com base nestas informações são determinadas as taxas de acoplamento para aquecimento e taxa de potência mínimas, graus e/ou fatores de acoplamento e de aquecimento. Conforme o acionamento seja direto ou indireto, no primeiro caso dispensa-se a determinação de taxas de acoplamento e graus fatores de acoplamento e de aquecimento. Uma vez concluído isto, pode-se passar para a fase seguinte que realizará entre outras coisas, os testes preliminares do motor com estes parâmetros para se saber se ele é ou não capaz de satisfazer as condições de acionamento da junta.

3.7.1.3 Nível de Determinação e Teste de Parâmetros Intermediários no Processo

Uma vez obtidos os parâmetros mencionados anteriormente, pode-se verificar as possibilidades do motor ser escolhido. Se o motor satisfazer as condições dinâmicas e cinemáticas como torques, velocidades e acelerações, estruturalmente não extrapolar os limites espaciais que lhes forem reservados nas estruturas dos elos de apoio, e se seu custo associado com os custos dos seus acessórios estiver dentro de condições econômicas satisfatórias, então ele é "**um motor com possível potencial para acionar a carga**". Se isto não ocorrer, o processo deve voltar ao nível anterior para a busca de um outro motor do catálogo. Entretanto, se não forem detectadas restrições pela verificação da compatibilidade entre o motor e a junta pelos critérios de velocidade, aceleração, torque, volume, custo e outros, este motor passa a ter "**forte potencial para acionar a carga**". Se, por outro lado, o acionamento da junta for do tipo indireto, realiza-se operações para a determinação dos limites das taxas de redução do acoplamento, que ocorrem pela interceção dos domínios estabelecidos pelos diversos critérios analisados neste capítulo e que são especialmente ilustrados e comentados na seção 3.4.11. Isto é feito pela determinação dos perfis das taxas de

potência, taxa de aquecimento, condições ambientais, grau de acoplamento e de aquecimento, fator de aquecimento e de acoplamento, taxas de acoplamento para taxa de potência e de aquecimento mínimas, da carga, do acoplamento e do motor, que caracterizam e definem os chamados parâmetros intermediários no processo de seleção.

3.7.1.4 Nível de Definição e Teste dos Parâmetros Terminais do Motor

Neste último nível da programação da seleção de atuadores, o redutor deve ser definido com a determinação da sua taxa de acoplamento após um refinamento na faixa de soluções possíveis. Logo após isto, devem ser finalmente definidos os parâmetros terminais do motor, importantes para o projeto do seu sistema de acionamento, controle, chaveamento, e amplificador, e para o conhecimento da taxa de utilização de sua capacidade. Esses parâmetros são: a temperatura do rotor em regime permanente, ou no final de uma operação em regime transitório, o perfil e os limites de corrente elétrica, a potência, o torque, a velocidade com carga, as tensões nos terminais do motor, e os parâmetros do motor selecionado.

Antes de encerrar o processo de seleção, deve ser feito também um teste nestes parâmetros para uma avaliação final. Se for verificado que há compatibilidade entre o sistema, a junta, o motor e o acoplamento escolhido, os atuadores da junta ficam definidos. Entretanto, se algum dos parâmetros analisados nos critérios apresentados não atender as exigências do sistema, um novo motor deve ser escolhido no catálogo, até que algum sirva, ou até que a lista de motores disponíveis no mercado seja percorrida até o fim. O final da lista pode ser alcançado por duas razões, a primeira seria a não existência de um motor que atenda a necessidade da junta naquela em toda a extensão da lista, e a segunda seria o interesse de quem conduz o processo de seleção em encontrar não um motor, mas o melhor de toda lista, ou uma faixa de motores que atendesse os quesitos da junta e tarefa associado ou não a um refinamento que poderia ser simultâneo ou posterior. Caso não seja encontrado uma motor que atenda os quesitos do carregamento oriundo das condições de tarefa, junta e ambiente, haverá necessidade de incrementar novos motores no catálogo, reprojeter a junta do manipulador e/ou projetar um motor específico para acioná-la. Caso os atuadores da junta sejam determinados com o encontro dos motores transmissões e redutores corretos, o programa ASELETUM entrega a resposta para o programa SIGECOSAM, avisando que terminou sua parte, este por sua vez, chama os programas AFICESE, e em seguida AMODIRO.

O programa AFICESE funde a estrutura deste atuador e seus acessórios na estrutura dos elos, colocando da forma compatível e exigida pelo programa AMODIRO, que deve remodelar o manipulador dinamicamente, redefinido as equações de esforços de cada junta incorporando as partes estruturais dos atuadores escolhidos para a junta em questão. Assim, logo em seguida, se ainda houver uma junta cujos parâmetros do respectivos atuadores não ficou definido, o programa SIGECOSAM, invoca o programa ASELETUM, para realizar esta tarefa atuando juntamente com os programas AFICESE e AMODIRO, e isto é repetido até que todas as juntas fiquem definidas.

3.7.2 SIGECOSAM - Sistema Geral de Coordenação de Seleção e Atuadores de Manipuladores

Entre os diversos programas apresentados neste trabalho, o SIGECOSAM representado na figura 3.11, é sem dúvida nenhuma o programa mais importante neste processo de seleção de atuadores. Ele é o programa central que supervisiona e coordena os demais programas que contribuem de alguma forma, em algum estágio deste processo. Ao mesmo tempo ele realiza a análise da equação dinâmica, da cinemática do robô, considera cargas e configurações estruturais dos elos e os demais bancos de dados, usados para auxiliar na seleção e determinação dos melhores atuadores, dos tipos de configurações estruturais dos elos da cadeia robótica, da escolha do melhor tipos de acionamento das juntas, direto ou indireto, e define as novas dimensões físicas e geométricas e o modelo dinâmico algébrico completo do robô projetado.

3.7.3 Uso do Aplicativo MATHEMATICATM e C++

A maior parte da programação foi realizada usando o aplicativo MATHEMATICATM, veja [WOLFRAM, 96], pois ele contém funções intrínsecas que permitem fazer a análise matemática de equações, e também fornece resultados algébricos de diversas operações, funções e expressões, facilitando a determinação algébrica do modelo dinâmico do robô, o que não encontramos no compilador de programa C++. Já o programa de simulação do manipulador e de entrada de dados sobre atuadores e as configurações, foi elaborado em linguagem C++, sobre a qual se tinha maior domínio para realizar a parte de visualização gráfica, que permitiu obter uma melhor apresentação em relação ao aplicativo MATHEMATICATM que ficou com a função de fornecer a base algébrica para uma análise do processo.

Os programas construídos no MATHEMATICATM, são genéricos e sua utilização para análise de manipuladores de outras programações que não o AAMMOVISA, APECAM e APECAR é fácil, e depende somente da manipulação ou geração correta dos bancos de dados pelo programador.

3.7.4 Descrição das Funções Desempenhadas Pela Programação

O programa SIGECOSAM, é considerado o programa principal, desempenhando a função de coordenar cada um dos demais programas, isolados ou em conjunto (com exceção do programa ASICITRIM que não é usado aqui), para resolver o problema da seleção de motores. As principais funções desempenhadas pelos programas supervisionados pelo SIGECOSAM são:

1. Homogenização de variação de tempo: executado pelo programa AHOVATA.
2. Determinação das equações dinâmicas de robôs: função que é desempenhada pelo programa AMODIRO.

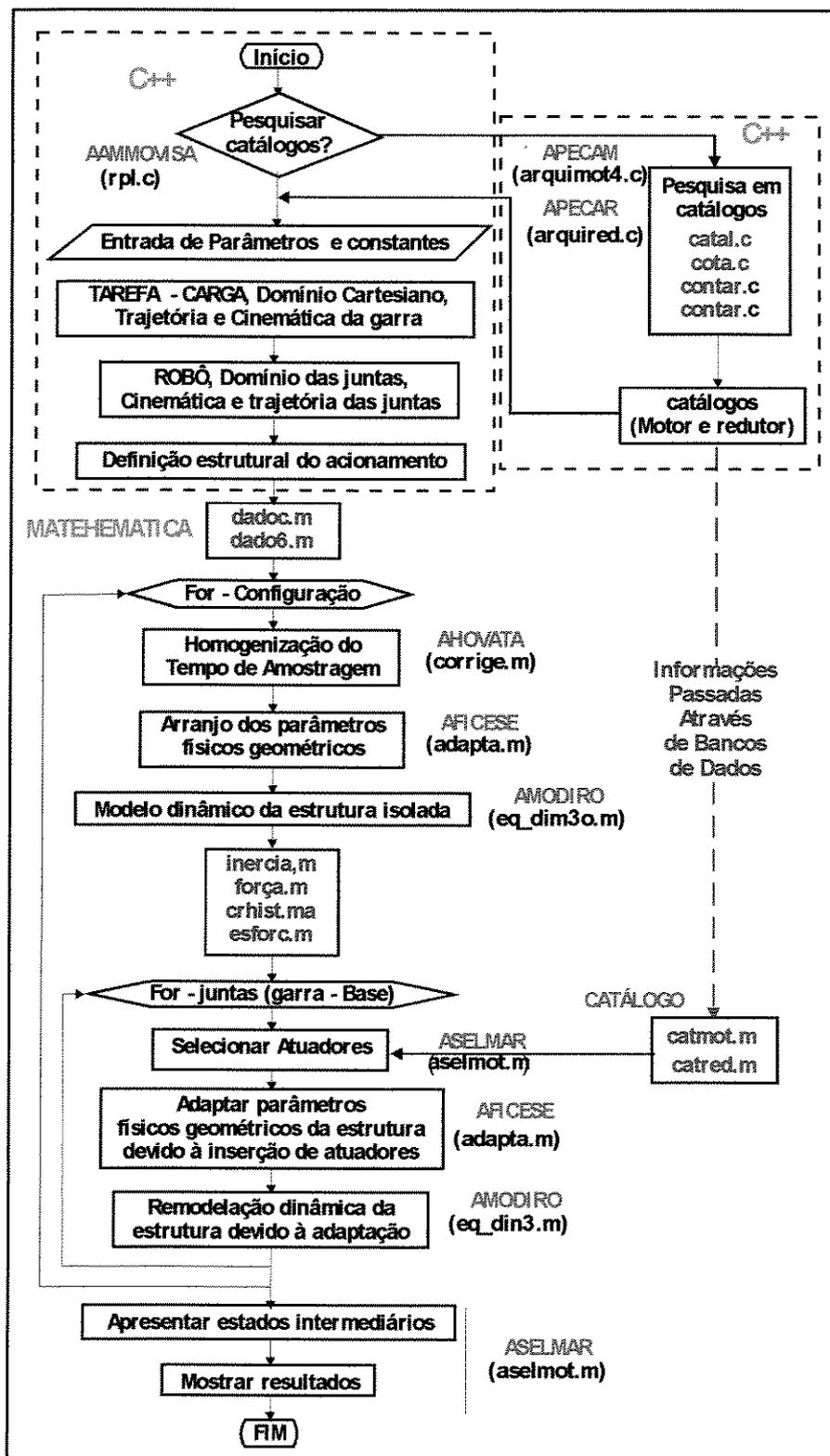


Figura 3.11: Fluxograma do SIGECOSAM

3. Apresentação visual do desempenho dinâmico das juntas: função resolvida pelo RAVIPED que executa um conjunto de funções do MATHEMATICATM, gerando os perfis das equações dinâmicas das juntas.
4. Apresentação visual cinemática das juntas: executada pelo RAVIPEC que mostra as funções adquiridas do banco de dados com os perfis cinemáticos gerados pelo programa AAMMOVISA.
5. Análise e verificação dos critérios de seleção de atuadores: elaborada pelo programa ASELATUM.
6. Escolha de atuadores para as juntas dos robôs: realizada através do programa ASELATUM
7. Exemplificação de modelagem algébrica default de manipuladores: AMODIRO.
8. Restruturação físico-geométrica da junta: executada pelo programa AFICESE.
9. Redefinição dinâmica da junta, que é a remodelagem após a adaptação executada pelo programa AMODIRO.

Há uma outra série de arquivos usados dentro desta programação, estes arquivos contém os dados necessários para a perfeita funcionalidade do programa, contendo informações sobre a estrutura do robô, a tarefa, a carga e o ambiente, a configuração do sistema de acionamento, as matrizes dos perfis cinemáticos ou de velocidade, aceleração e posição angular e dos parâmetros dos atuadores (motores e redutores e transmissões) contidos nos arquivos dos catálogos.

Este programa, em conjunto com os demais, adquire os parâmetros para a execução de suas tarefas de diversos modos, e as cinco formas mais importantes são:

1. Aquisição de parâmetros por arquivos de atribuição gerados externamente. Este modo de aquisição é usado para leitura dos parâmetros de arquivos especiais que informam o nome destes parâmetros e seus valores gerados pelos programas em C++, como o AAMMOVISA, mesmo que sejam os perfis cinemáticos contidos na forma de matrizes no arquivo DADOC.M. Os parâmetros da carga sobre a configuração e situação desejada para o acionamento, o tempo de aquisição ou realização da tarefa, ou o número de pontos lidos no intervalo contidos no programa DADO6.M. Também são lidos os bancos de parâmetros dos motores (catálogos) guardados nos arquivos ARQUIMOT.M e ARQUIRED.M gerados respectivamente pelos programas APECAM e APECAR.
2. Aquisição de parâmetros por arquivos de atribuição gerados internamente. São dados produzidos em arquivos pela própria programação e usados internamente, são eles: CHRIST.MA que detém a matriz com os símbolos de Christoffel (coriolis e centrífuga) do modelo dinâmico, INERCIA.MA que contém os termos inerciais do robô, FORCA.MA com as equações dinâmicas, e ESFORC.MA contendo a matriz com o perfil dinâmico das juntas para as condições cinemáticas estabelecidas e produzidas pelo programa AMODIRO, banco de dados "DAD1o" que contém os parâmetros representando as condições originais para a s

juntas, banco de dados "DAD2o" que contém os parâmetros de eventuais atuadores substitutivos, banco de dados "DAD4o" que contém os dados de eventuais dos parâmetros físicos resultantes, e banco de dados "DAD5o" que contém os coeficientes de posição relativas dos atuadores.

3. Dados retidos na memória após o equacionamento anterior. Sempre que um programa é gerado, muitos parâmetros são descarregados da memória para liberar espaço e agilizar o processamento. Dependendo do processo, alguns dados são retidos na memória para outras execuções futuras.
4. Por leitura atual do teclado, poucos dados são adquiridos para fornecer informações sobre decisões a serem tomadas durante a execução ou a entrada de dados e parâmetros sobre os robôs, tarefas, e acionamento.
5. Usando dados de modelos "default" intrínsecos deste programa. Este tipo de parâmetros está incorporado na programação e preparado para ser usado quando a entrada de tais dados for ignorada. Isto vale para os parâmetros de Denavit Hartenberg, configurações de acionamento e eventuais parâmetros virtuais usados para a simulação da modelagem dinâmica.
6. Arquivos de dados pré-construídos. São dados colocados em programas como INDENT.M feitos exclusivamente para conter informações que ajudam na funcionalidade do programa, representando endereços de alguns parâmetros.

As cinco figuras que seguem mostram de uma forma geral os fluxogramas da troca de dados entre os programas.

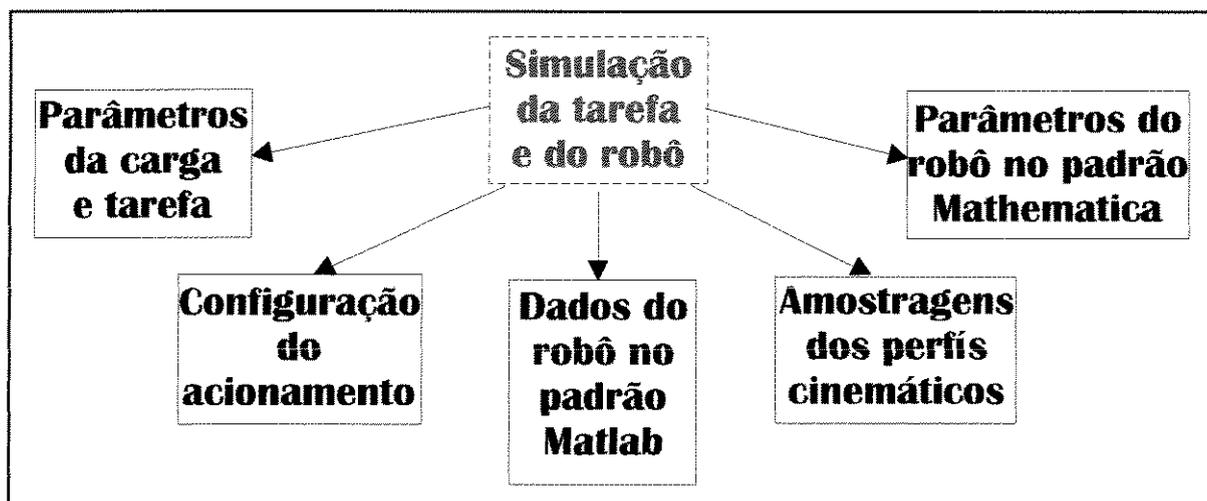


Figura 3.12: Fluxo de dados em torno de AAMMOVISA

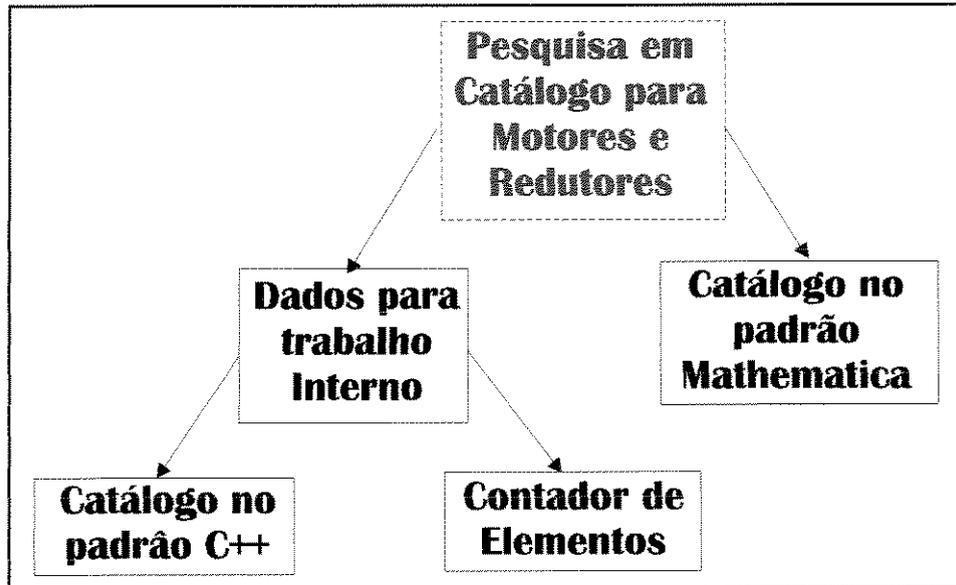


Figura 3.13: Fluxo de dados em torno de APECAM e APECAR

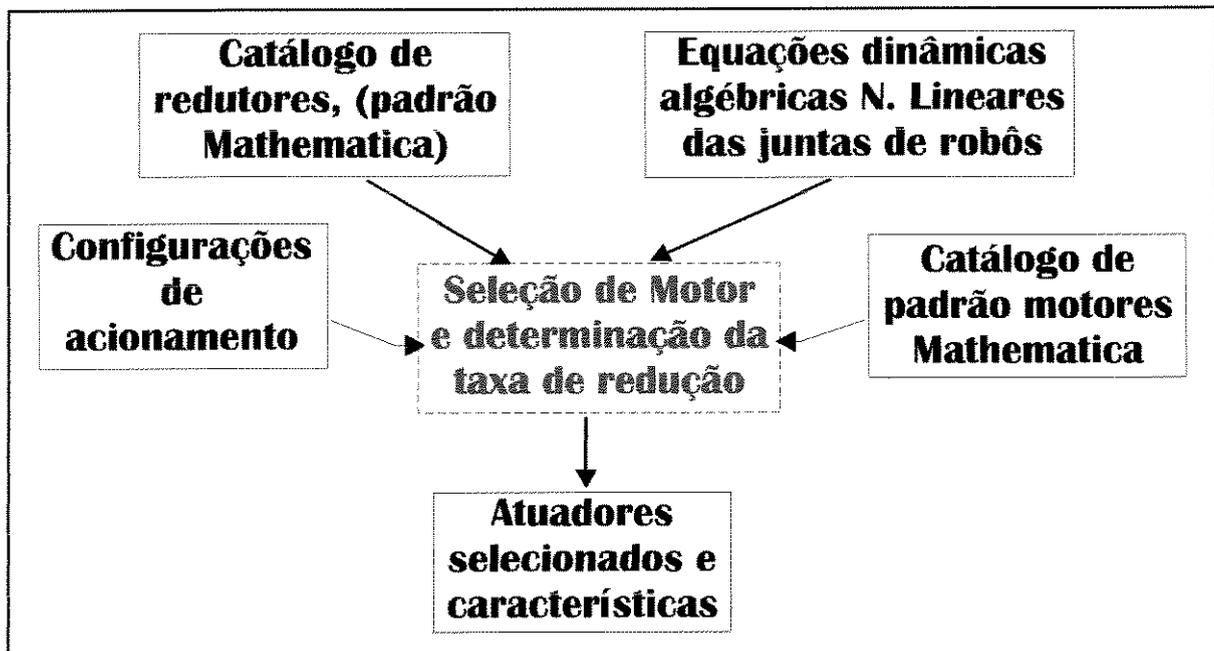


Figura 3.14: Fluxo de dados em torno de ASELATUM

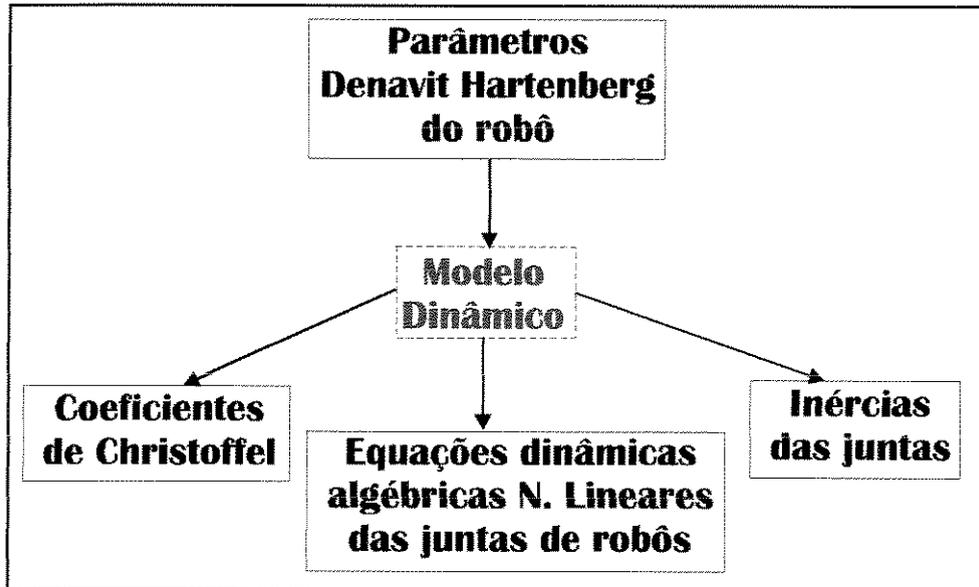


Figura 3.15: Fluxo de dados em torno de AMODIRO

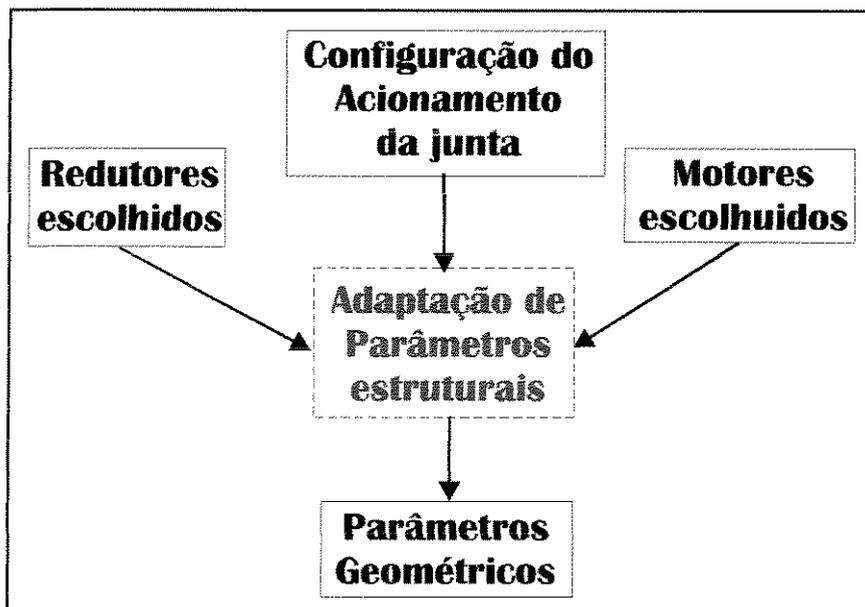


Figura 3.16: Fluxo de dados em torno de AFICESE

3.7.4.1 Fluxo da Programação

Quando programa SIGECOSAM é inicializado, uma série de questões é feita ao operador de modo iterativo utilizando a tela e o teclado para que a programação seja direcionada para a definição reconhecimento do problema cuja solução é desejada.

Há uma apresentação de uma tela que verifica se é a primeira vez que ele está sendo rodado, para que sejam ativadas as funções que trabalham com produto vetorial.

Nos passos seguintes, a troca de informações ocorre no sentido de verificar se a modelagem dinâmica requerida está voltada para os modelos algébricos *default*, ou se será definido outro modelo. Resolvida esta questão, volta-se para a leitura de dados e em seguida para a homogenização da variação de tempo se ela não for constante.

Assim, a programação pode ser seguidamente direcionada para o processo de seleção de atuadores, ou somente à verificação ou observação dos perfis cinemáticos e/ou dinâmicos finalizando as operações. Para qualquer uma destas operações que trabalham com modelagem dinâmica, o passo seguinte é a configuração dos parâmetros físicos e geométricos de cada elo no padrão de operação do programa.

Tudo que foi descrito até aqui sobre o programa serve de base para os estudos preliminares e para a preparação do processo de seleção de atuadores, análise do acionamento, e readaptação dinâmica e estrutural dos atuadores.

O primeiro passo desta nova fase começa com a criação de um laço que percorre as juntas da garra para a base, são varridos os perfis cinemáticos do pelo robô que forma determinado pela simulação para as condições propostas e estabelecidas para a carga, e são retirados os limites críticos das funções, como os valores de picos e eficazes de cada parâmetro importante para no processo de seleção. Dependendo do tipo de acionamento da junta, é percorrida a lista de motores até que seja selecionado um entre os atuadores contidos nos catálogos, que satisfaça as condições estabelecidas.

Uma vez que um atuador de um i-ésimo elo é procurado, a resposta final de sua aceitação é precedida da incorporação estrutural dos dispositivos atuadores selecionados para as juntas acima dele, no elo da junta que ele aciona e cujo motor se deseja encontrar. No meio deste processo, é feita a padronização dos parâmetros físico e geométricos da nova estrutura.

A junta da base do manipulador é a última procurada pelo processo, e quando o atuador daquela junta é selecionado, o processo encerra-se e os dados ficam disponíveis, caso contrário, incrementa-se o laço e o processo começa analisar outra junta.

3.8 Considerações Finais do capítulo

Neste capítulo foram estudados vários critérios de seleção de atuadores para juntas de manipuladores robóticos industriais. Alguns critérios apresentados pela bibliografia especializadas não foram direcionados especificamente para manipuladores, e por isto foram adaptados neste trabalho para juntas robóticas.

Por exemplo, [SHNEYDOR, 89] desenvolve um método para analisar a capacidade de carga e os limites de aquecimento utilizando as taxas de potências e taxas de aquecimento para acionamento de cargas com acoplamento indireto reduzido. Nesta tese, esses estudos que antes eram direcionados para exclusivamente para acionamento indireto, foram também direcionados para os acionamentos não reduzidos, veja seção 3.5.

Os momentos de inércias vistos por um motor através de um determinada junta na cadeia cinemática de um manipulador, não depende somente do momento de inércia próprio da junta, o qual varia conforme a configuração estrutural da mesma, e portanto depende das variações dinâmicas causadas pelas modificações da configuração do próprio elo oriundo do deslocamento de componentes móveis tais como êmbolos e guias de cabos que se deslocam sobre os fusos, como ocorre com alguns elos da cadeias de posicionamento do robô JECA II.

Os momento de inércia vistos pelo motor de uma determinada junta dependem também das configurações geométricas dos outros elos e das cadeias de posicionamento e de orientação, que podem estar mais próximas ou distantes da junta acionada e também da posição da ponta da garra em função da tarefa executada pelo manipulador. Isto faz com que as forças inerciais sobre as determinada juntas inferiores nas cadeias sofram mudanças consideráveis uma vez que elas sustentam as demais.

O momento de inércia em torno de uma junta, só será constante, se em torno dela e para todo percurso da tarefa, for realizada a compensação total dos momentos de gravidade das massas móveis que compõem todos os elos, as cadeias cinemáticas e as partes situadas acima dela incluindo a carga do manipulador.

Uma das restrições das técnicas de análise feita por [SHNEYDOR, 89], é que ele trabalha considerando o acionamento de cargas industriais constantes ou adotando um modelo invariante das mesmas, conseqüentemente considera o momento de inércia constante. Isto, em vista das questões colocadas nos parágrafos precedentes, poderia causar distorções na resposta final, implicando numa escolha e dimensionamento errado para o motor, o redutor, e o acionamento do motor quando sua carga for a junta de um manipulador. Uma falha como esta, poderia levar estes atuadores ao sobreaquecimento, ou incapacidade de acionar a sua respectiva junta. **Em função disto, este capítulo desta tese foi desenvolvido preocupando com a criação de um processo seleção de atuadores integrada com a modelagem dinâmica para manipuladores industriais, levando em consideração as alterações dos parâmetros dinâmicos, e modificações estruturais.**

A seleção de atuadores integrada com a modelagem dinâmica dos manipuladores indus-

triais é uma característica própria deste trabalho, e apresenta a vantagem de considerar a influência da estrutura dos motores na estrutura do manipulador na hora de escolher os motores, redutores, transmissões e conversores, para as juntas de ordem superior na cadeia, ou seja daquelas que se encontram mais próximas da garra, pois as mesmas atuam como carga para as juntas de ordem inferior, ou seja, estão mais próximas da base. Este trabalho de coordenação entre seleção de atuadores e modelagem dinâmica é desenvolvido pelo programa SIGECOSAM.

Outra restrição quanto a proposição de [SHNEYDOR, 89] é que ele determina a taxa de potência, e taxas de redução, usando a soma dos valores de pico das parcelas integrantes do torque eletromagnético total do motor. Enquanto neste trabalho, obtém-se o modelo dos motores através dos parâmetros de catálogos, utiliza-se este modelo como se ele fosse o ideal, sendo determinado os perfis dinâmicos somente através da análise dos parâmetros, que passa por três níveis de verificações: Respostas preliminares, respostas intermediárias, e respostas terminais. Após toda a simulação é que pode-se dizer que conjunto é compatível, e portanto, motores, redutores, e juntas combinam-se sendo aprovados e definitivamente escolhidos para o sistema de acionamento da junta. Estas verificações são executadas pelo programa ASELATUM.

Capítulo 4:

Resultados Obtidos por Simulação Computacional

Este capítulo, tem a finalidade de apresentar os principais resultados obtidos através das simulações executadas através de computador, e demonstrar as afirmações e hipóteses mais importantes descritas nos capítulos anteriores. Como se trata de um capítulo extenso, será feito nesta introdução a apresentação dos conteúdo por seção, para que o leitor fique situado, sem se dispersar.

Inicialmente, serão apresentados os principais resultados da parte da programação que simula algumas condições, tarefas, ambiente, e tipos simples e típicos de manipuladores robóticos industriais, bem como as formas de apresentações visuais das tarefas, condições de operação através do vídeo. Para isto é usado a **seção 4.1** que se divide em três partes: A primeira mostra as respostas e **comportamento cinemático e dinâmico** de diferentes tipos de manipuladores se movendo **através do tempo e do espaço**, a segunda mostra evolução de um **manipulador espacial** projetado no vídeo, e a última mostra alguns **tipos variados de manipuladores planares** executando tarefas básicas diversas.

Na **seção 4.2** valida-se o **processo de modelagem cinemática e dinâmica** do programa AMODIRO apresentado no capítulo 2. Para isto, os resultados das simulações realizadas neste trabalho, serão comparados com aqueles da bibliografia especializada: As dimensões e condições de operações de um robô planar definidos em [LATRE, 92], os passos do método de modelagem pelas equações de Euler Lagrange de [SPONG, 89], algumas equações dinâmicas algébricas definidas em [SPONG 89] e [LATRE, 92] e algumas respostas numéricas e gráficas da cinemáticas e dinâmicas contidos em [LATRE, 92].

O principal objetivo desta tese, conforme o capítulo 1, é selecionar atuadores para as juntas de manipuladores. Foi visto no capítulo 3, que a previsão e conhecimento dos esforços das juntas de um manipulador é importantíssima para a definição dos principais critérios de seleção de atuadores. O conhecimento correto dos esforços das juntas de um manipulador, por sua vez, depende da modelagem completa do manipulador que deve considerar os diversos parâmetros geométricos o momento de inércia e o centro de massa e massas dos elos e suas cargas conforme visto no capítulo 2. Então, na **seção 4.3** deste capítulo, apresenta-se os **fatores que influenciam na determinação correta dos parâmetros geométricos e massas dos elos** que são os seguintes:

1. Localizações dos centros de massas dos elos do manipulador.
2. Compensação dos momentos de gravidade no elos do manipulador.
3. Diferentes distribuições dos atuadores inerentes das configurações do acionamento.
4. Diferentes localizações dos atuadores na estrutura dos elos.

5. Diversos algoritmos cinemáticos empregados nas juntas do manipulador.
6. Diferentes formas de trajetórias da garra do manipulador.
7. Diferentes perfis de variação de tempo para trajetórias definidas por curvas paramétricas
8. Tempo de realização da tarefa
9. Adaptabilidade do modelo dinâmico aos parâmetros geométricos
10. Diferentes tempos de execução de tarefas.
11. Variância e invariância do modelo dinâmico.
12. Mudança Intensidade da carga da garra do manipulador
13. Presença de carga ou realização de esforço na garra do manipulador.

Na seção 4.4, são analisadas as **influências das condições de operações**, tais como: as características da carga e do ambiente e os parâmetros dos motores e dos redutores obtidos dos catálogos, placas de identificação ou medidos em laboratório, e as suas relações **com os parâmetros de seleção de atuadores** como a taxa de redução, a taxa de potência de carga, a taxa de potência de acoplamento, a taxa de potência do motor, a taxa de aquecimento de carga, a taxa de aquecimento de acoplamento, a taxa de aquecimento do motor, o grau de acoplamento, e o grau e o fator de aquecimento.

Posteriormente, na seção 4.5, será feita uma análise da **minimização do consumo de energia** considerando que os motores são de corrente contínua, e que eles acionam cargas com movimento incremental. Em seguida, por simulação serão apresentados os **efeitos de cada algoritmo aplicado** com esta finalidade na trajetória, **nos perfis cinemáticos e na dinâmica** da garra de um manipulador.

A seção 4.6 mostra as curvas do comportamento dos **parâmetros básicos** exigidas em alguns dos passos mais importantes do processo de seleção de atuadores e que são geradas através do programa ASELATUM. Merece destaque algumas superposições de curvas que permitem comparar a precisão das respostas para cada **tipo de modelo dinâmico adotado para cada junta**, e a **adaptabilidade** ou não do modelo dinâmico com os fatores que mudam os parâmetros geométricos e a massa da carga.

E finalmente na seção 4.7, são apresentadas as curvas dos **parâmetros terminais** dos principais critérios de seleção de atuadores que são: os torques, a velocidade da junta, a tensão e a corrente elétricas aplicadas nos terminais da armaduras do motor de cada uma das juntas através do tempo de realização da tarefa são apresentadas. Estes são informações importante para a determinação do sistema de amplificação chaveamento e acionamento do motor das juntas. E finalmente, será mostrada e discutida uma listagem típica apresentada como resposta, que é obtida no final da execução do programa de seleção de atuadores e que descreve cada uma das características importantes do processo.

4.1 Condições, Tarefas, Ambientes, e Tipos Típicos de Manipuladores.

No anexo A, é apresentado o programa AAMMOVISA que tem a função de gerar algumas condições, tarefas, ambiente, e tipos simples e típicos de manipuladores robóticos industriais, com a

finalidade de prover um suporte para a parte da programação que realiza a seleção de atuadores e que determina a distribuição destes atuadores na estrutura dos manipuladores. É sobre este programa que se mostrará alguns gráficos contendo a forma, o comportamento e a evolução destes manipuladores, bem como algumas respostas cinemáticas.

Para mostrar a validação da geração dos modelos, um deles segue as condições de de operações do robô planar encontrado em [LATRE 92] e [LATRE 88] que segue uma trajetória retilínea com a ponta da garra, como visto na figura 4.1, a resposta deste modelo em especial é muito semelhante, embora de melhor resolução, uma vez que não tem o compromisso de mostrar o processo passo a passo, como em [LATRE 92].

A figura 4.1a, mostra o manipulador na posição final de sua tarefa, que é descrita graficamente por uma linha dentro de dois círculos que demarcam a área de trabalho da cadeia de posição e da garra, uma vez que este modelo é essencialmente planar, a figuras 4.1b mostra os perfis de posições angulares das juntas isoladamente, e do ângulo entre a linha que liga a garra ao pé do manipulador, a figura 4.1c, mostra a velocidade angular, e na figura 4.1d são mostrados os gráficos das acelerações das juntas.

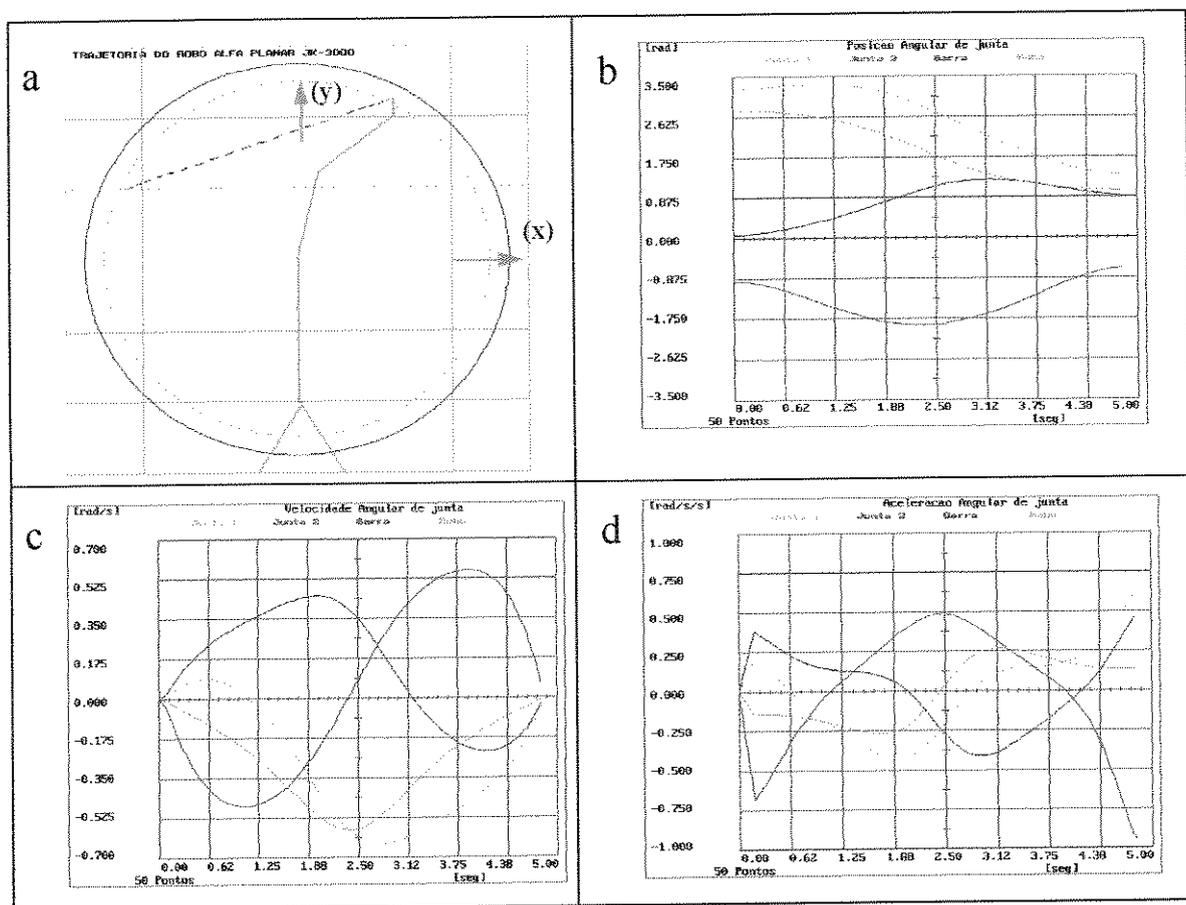


Figura 4.1: a) Simulação do manipulador e das condições apresentadas por [LATRE 92], b) ângulos das juntas, c) velocidades das juntas, d) acelerações das juntas.

Obs: 1) A variável denominada **robô**, encontrada no gráficos das figuras 4.2, 4.2 e 4.3, é o ângulo entre a linha que liga o centro do sistema de coordenadas referencial até a ponta da garra e o eixo horizontal que passa pelo centro do sistema de coordenadas referencial.

Obs: 2) A não anulação da aceleração das juntas no final do tempo de execução da tarefa, é consequência do truncamento da curva por causa do método de simulação adotado naquele caso, veja mais informações na seção A.2.2.2.

A apresentação feita aqui é estendida com modelos e condições diferentes e com uma riqueza maior de algoritmos cinemáticos que enriquece este item e o faz excêntrico e justificável neste trabalho, como será comprovado e validado nos itens que seguem, e que mostram gráficos que descrevem condições de operações especiais, mostra a evolução de modelo e tarefas diferenciadas, incluindo a evolução de um manipulador espacial simplificado em quatro graus de liberdade.

4.1.1 Respostas aos Diferentes Tipos de Manipuladores.

As figuras 4.2 e 4.3 mostram o comportamento do manipulador da figura 4.1 executando tarefas diferentes daquelas impostas em [LATRE 93]. A figura 4.2 mostra as condições de um manipulador que descreve três voltas em torno de um círculo, a evolução no tempo do ângulos de juntas, veja figura 4.2a, as velocidades das juntas mostradas na figura 4.2c, e as acelerações das juntas como mostra a figura 4.2d.

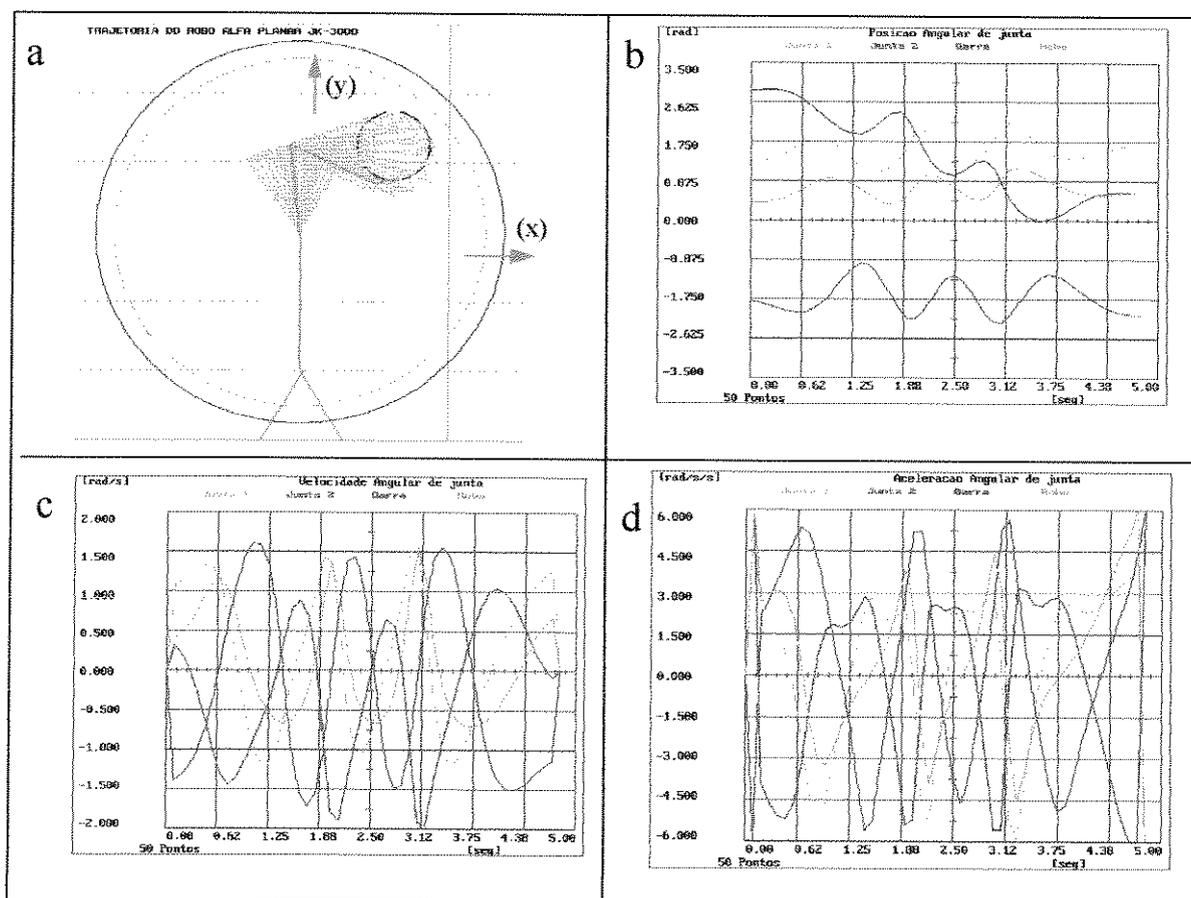


Figura 4.2: Simulação de manipulador planar de 3GL, descrevendo três círculos no espaço, b) posições angulares, c) velocidades das juntas, d) acelerações das juntas.

Um novo grupo de ilustrações é mostrado na figura 4.3, para apresentar o mesmo manipulador seguindo com a ponta da garra uma trajetória retilínea diferente daquela mostrada em [LATRE 92].

Esta nova condição de tarefa e as respostas cinemáticas providas dela, serão utilizadas como referência para diversos estudos analíticos sobre o comportamento dinâmico dos manipuladores até o final deste capítulo, as quais deverão permitir a tirada de conclusões importantes nesta tese.

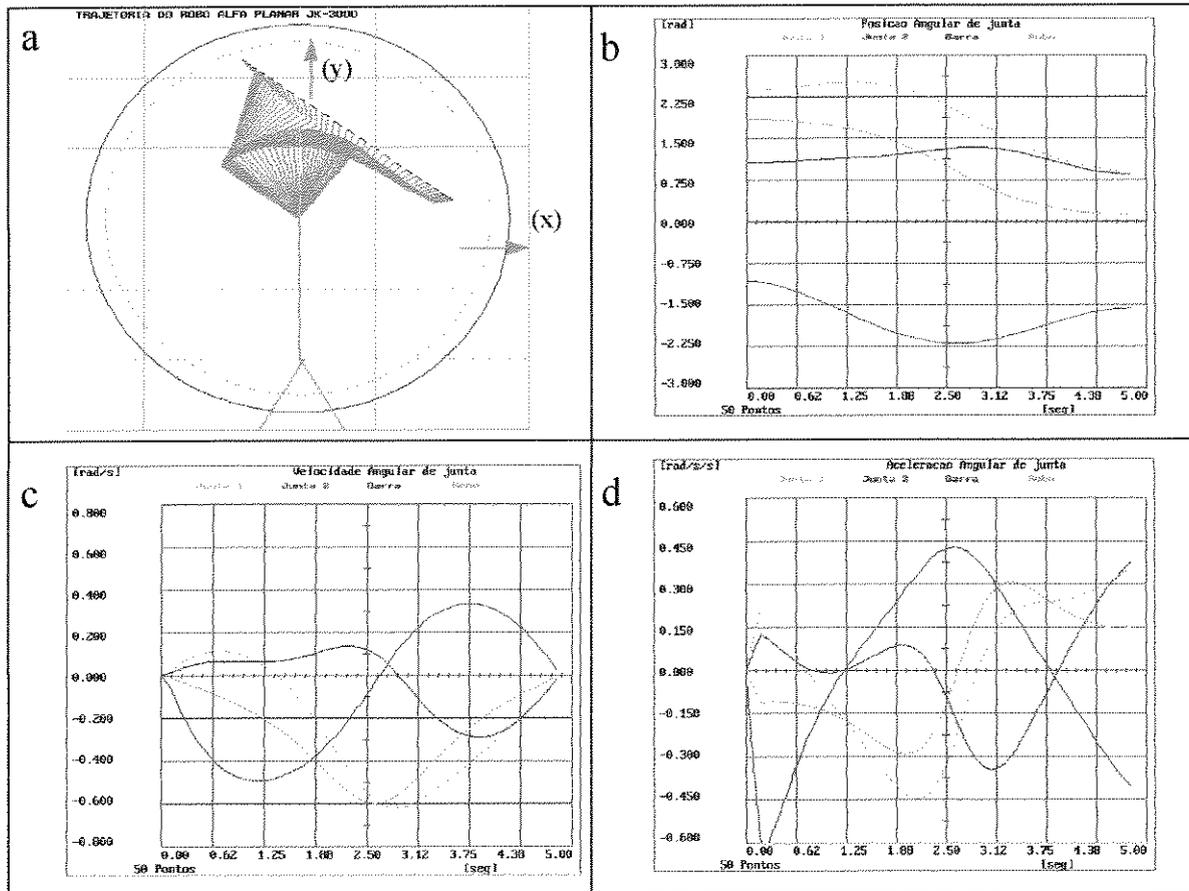


Figura 4.3: a) Simulação de manipulador planar realizando a tarefa usada como referência nesta tese, b) posições angulares, c) velocidades das juntas, d) acelerações das juntas

4.1.2 Evolução de um Modelo de Manipulador Espacial.

Apesar de se ter optado por usar modelos de manipuladores planares, foi feita uma tentativa bem sucedida de gerar um modelo de simulação de manipuladores espaciais. Neste modelo procurou-se simular um protótipo semelhante ao robô JECA II, veja na figura 4.4, onde cada uma das juntas é representada por uma cor diferente, o punho a garra ou a cadeia de orientação completa são representadas pelo único elemento indicado pela cor verde, o braço é representado pela cor vermelha, o antebraço pela cor magenta, e a base do manipulador pela cor azul marinho. Neste trabalho, esta simulação representa um importante passo na evolução da simulação de manipuladores, uma vez que se aproxima da simulação de condições de operações de manipuladores reais.

Na figura 4.4a é mostrada a evolução espacial deste manipulador, e nas figuras 4.4b, 4.4c e 4.4e, são mostrados as projeções da vista espacial nos respectivos planos ortogonais xy, yz, e zx do sistema de coordenada cartesiana referencial, cujo centro localiza-se na base do manipulador como mostrado. As velocidades e acelerações e posições angulares deste modelo não são registradas, pois requerem a construção de algoritmos especiais não concluídos.

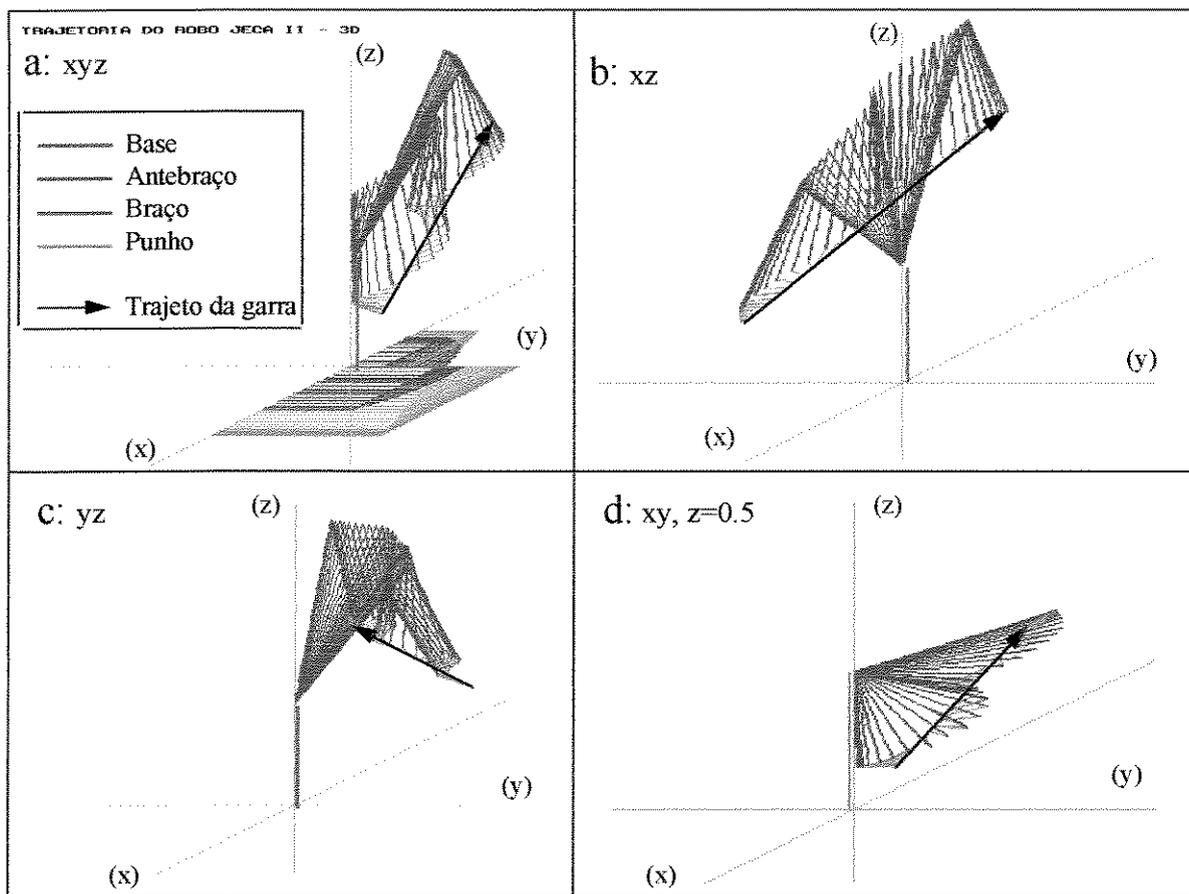


Figura 4.4: Simulação de manipulador a) percorrendo uma reta espacial com a ponta da garra, b) projeção no plano xz, c) projeção no plano yz, e d) projeção no plano xy.

O programa que gera estes resultados para manipuladores espaciais como mostrado na figura 4.4, é o ASICITRIM - Algoritmo de Simulação Cinemática de Manipuladores Tridimensionais. Este programa é dotado de funções especiais que trabalham com coordenadas do espaço 3D, e que projetam a imagem das simulações espaciais no plano da tela do computador. Ele não é dotado das funções que auxiliam na determinação da distribuição de atuadores na estrutura do manipulador, das funções que geram as matrizes de variáveis espaciais, dos ângulos entre uma reta para outra, da análise dos ângulos de Euler importante na resolução do problema da cinemática inversa, não contém uma função que gerar bancos de dados e nem possui instruções "defaults" que determinam os parâmetros de Denavit Hartenberg, apesar de que o desenvolvimentos destas funções foi planejado, e a análise do mesmo permite afirmar que estas podem ser facilmente implantadas, baseando-se no programa de simulação do manipulador planar ou na bibliografia especializada.

4.1.3 Variedades de Modelos de Manipuladores.

A finalidade desta seção é mostrar as outras vantagens e habilidades do programa de apoio chamado AAMMOVISA, através de modelos simples alguns resultados visuais gerados para diferentes formas de tarefas e tipos de cadeias cinemáticas de manipuladores. Ela ilustra a multiplicidade de opções para aplicações de manipuladores que dependem das necessidades comerciais e técnicas e visa

a escolha correta do manipulador para cada tarefa. Estas variações são mostradas nas ilustrações das figuras 4.5, a 4.8, que foram produzidas através do programa AAMMOVISA que é explicado no anexo A. Para melhor apresentação das características que avaliam os resultados destas simulações, em cada uma das figuras citadas é evidenciado um entre os 4 grupos de critérios citados abaixo, dentro dos quais os três últimos influenciam no processo de seleção de manipuladores. Estes grupos de critérios são:

1. a forma de apresentação visual,
2. o tipo de estrutura do manipulador apresentado,
3. o número de graus de liberdade do manipulador
4. e o formato da tarefa executada por ele durante a simulação.

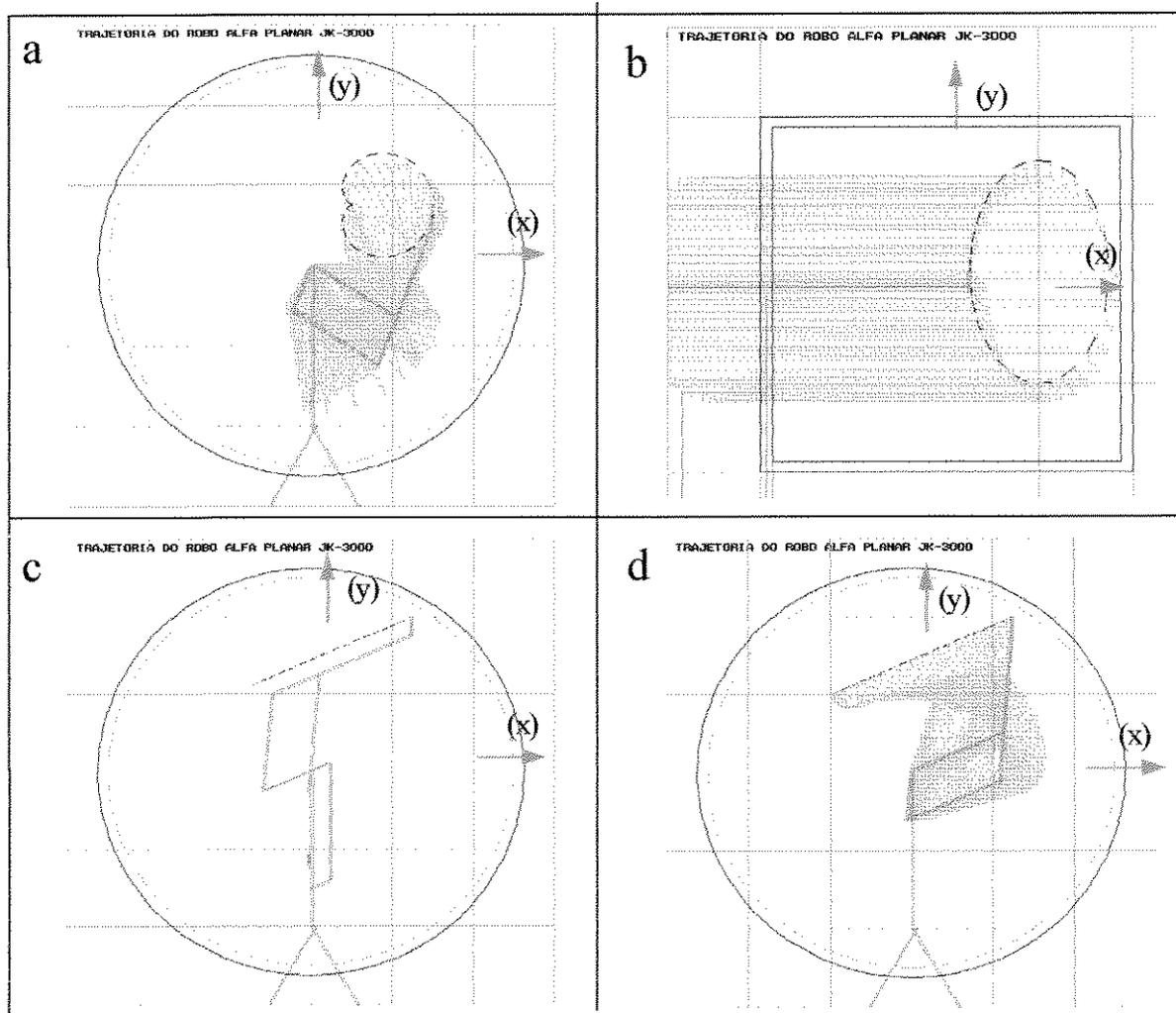


Figura 4.5: Simulações de Operações de manipuladores planares e seus ambientes, a) com barras paralelas 3GL, tradicional, b) cartesiano, c) Outra variação para barrar paralelas d) caso a com 2GL.

a) Apresentação Visual.

A apresentação visual do manipulador é o quesito apresentado pela forma com que o programa mostra o manipulador após a simulação da tarefa, durante cada passo da execução da tarefa, e isto pode ser apresentada de três formas diferentes:

1. Na primeira, ele ilustra o manipulador em cada uma amostragem de uma única cor (verde), como é apresentado nas figuras 4.3a e 4.7b.
2. Numa outra, ele ilustra o manipulador em cor verde na última amostragem, e cor de cinza nas amostragens intermediárias, isto é evidenciado nas figuras 4.2.a, 4.7a e 4.7b., 4.5a, 4.5b, 4.5d, 4.6a, 4.6c, 4.6d, 4.7a, 4.7c, 4.7d, 4.8a, e 4.8c.
3. na última forma ele não mantém o conjunto das imagens geradas em cada amostragem, mas somente a imagem da última amostragem, como ilustrado nas figuras 4.1a, 4.5c, 4.6c 4.8b e 4.8d, onde os manipuladores são desenhados em cor verde.

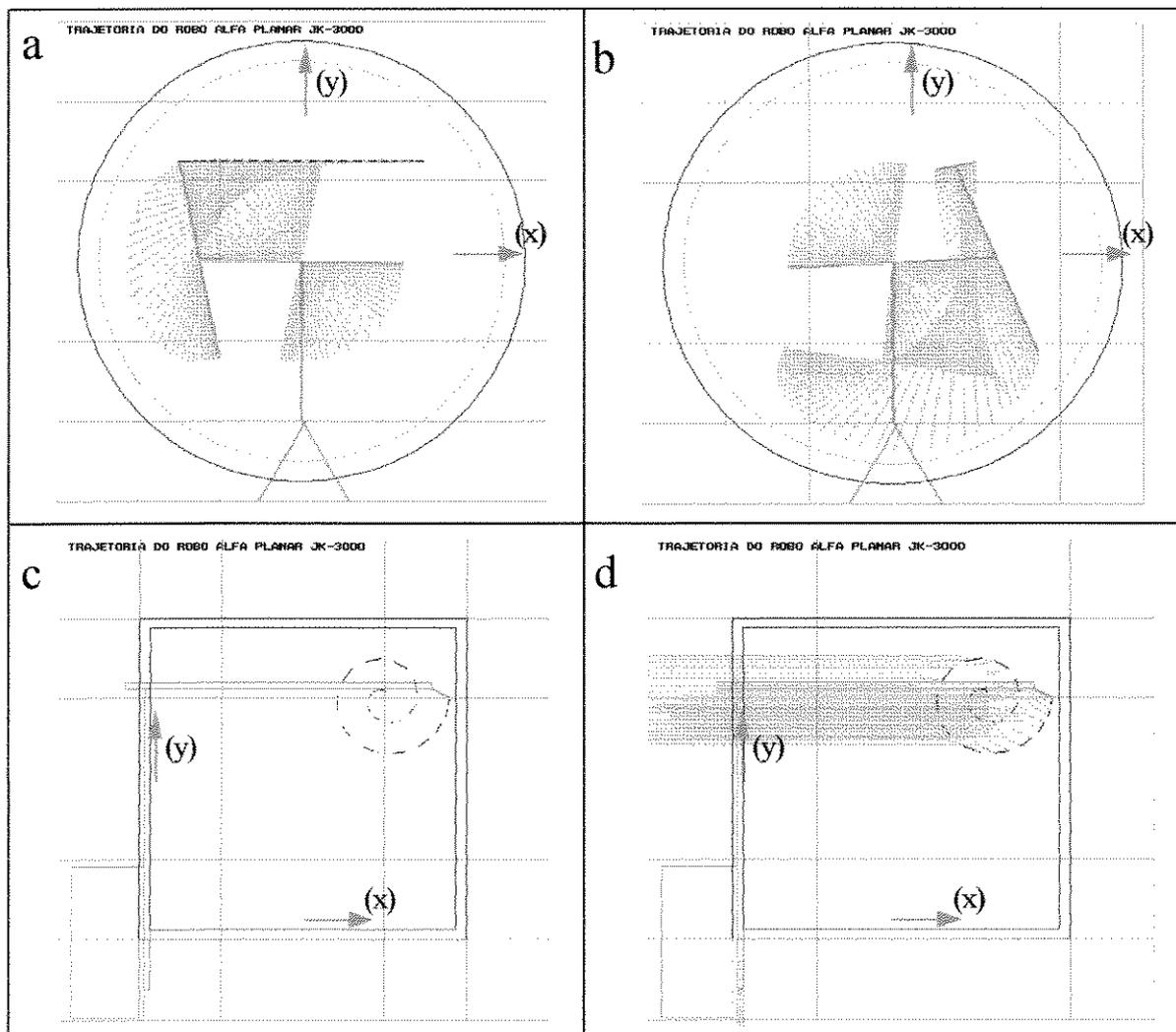


Figura 4.6: Simulações de Operações de manipuladores planares e seus ambientes, a) e b) com compensação de desequilíbrio de massa, GL diferentes, c) e d) cartesiano e apresentações diferentes.

b) Variação do Número de Graus de Liberdade do Manipulador

A importância do número de GL (graus de liberdade) no processo de seleção de manipuladores está na complexidade do sistema manipulador assumido com o aumento deste parâmetro. Neste caso foram estudados apenas modelos com até três graus de liberdades, o suficiente para analisar a influência de múltiplos graus de liberdades no processo de seleção. Assim sendo, são apresentados:

1. Modelos de três graus de liberdade, ilustrados pelas figuras, 4.1a, 4.2b, 4.3c, 75, 4.6b a 4.6d, 4.7a, 4.7c, 4.7d, 4.8a, 4.8b e 4.8d.
2. Modelos de dois graus de liberdade, ilustrado pelas figuras 4.6a e 4.8c.
3. Modelos de um grau de liberdade ou junta isolada aquele que é ilustrado na figura 4.7a. Sua finalidade é apenas ilustrativa, uma vez que não se trate de um manipulador.

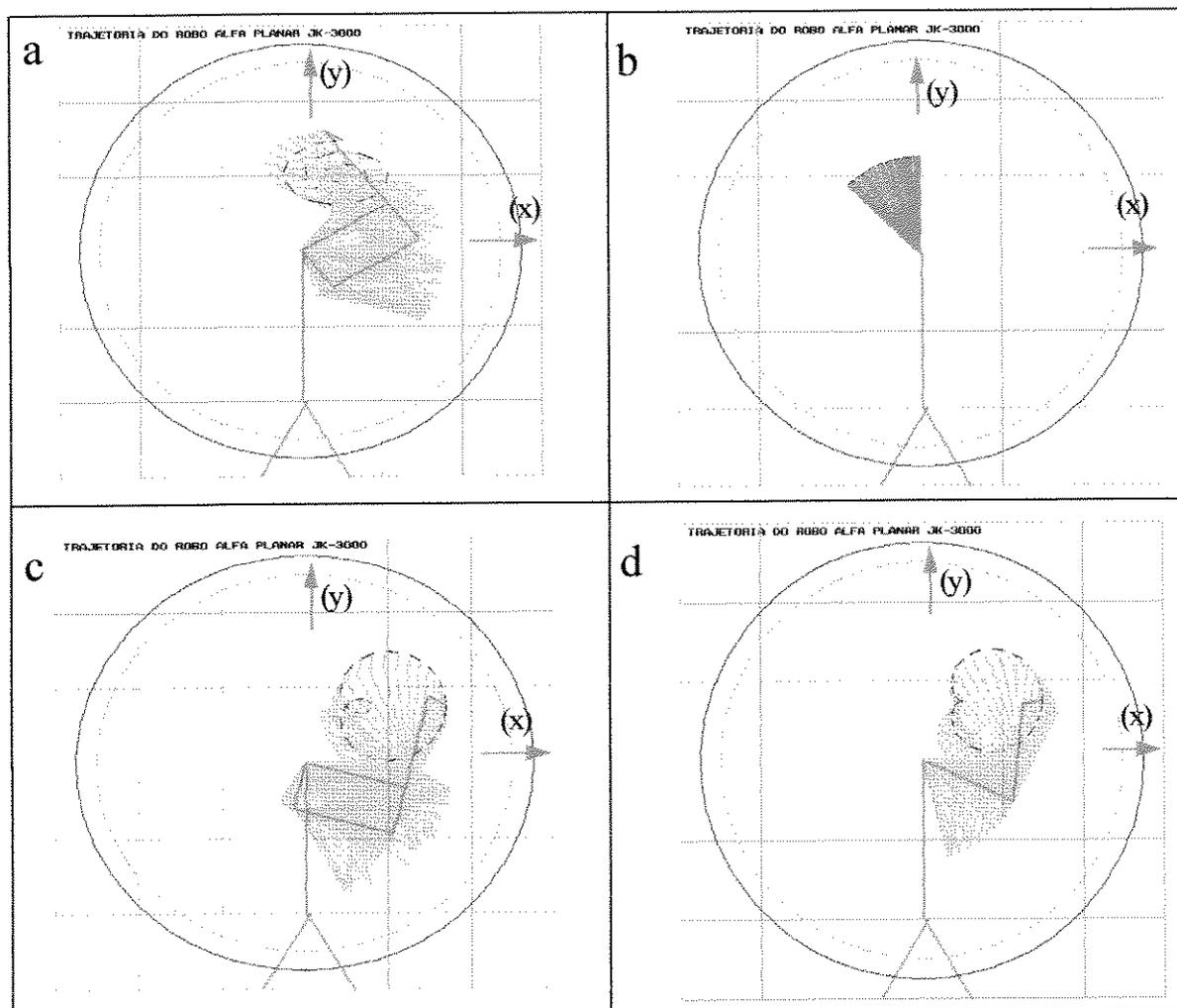


Figura 4.7: Destaque para as estruturas e tarefas dos manipuladores, a) e c) barras paralelas com trajetórias espiral elíptica e cardioide, b) IGL percorrendo um arco, c) 3GL Simples descrevendo trajetória cardioide.

c) Ênfase ao Tipo de Estrutura do Manipulador

O tipo de estrutura pode influenciar, no comportamento cinemático e conseqüentemente dinâmico, na forma de ação de cada junta do manipulador, o que também define a estratégia e o custo do atuador e tipo de acionamento de cada junta de um manipulador, por isto foi enfatizado a simulação da variedade deste critério. Os tipos básicos de estruturas de manipulador são os seguintes:

1. As estruturas simples, seguem o modelo de um braço do ponto de vista exterior, e são apresentadas nas figuras 4.5a, 4.5c, 4.5d, 4.7a, 4.7b, 4.8a e 4.8d.

2. A estrutura destacando a compensação de desequilíbrio de massas em torno das juntas é ilustrada nas figuras 4.5b, 4.5a, e 4.5b. Esta estrutura é de especial importância no estudo da seleção de manipuladores, pois, mostra um procedimento que pode reduzir significativamente a intensidade de esforços nas juntas do manipulador, requerendo atuadores menos robustos e mais baratos para acionar as juntas, o que será comprovado em itens posteriores deste capítulo.
3. A estrutura paralela (tradicional) com quatro barras é ilustrada nas figuras 4.5a, 4.5d, 4.7a, 4.7c, 4.7d, 4.8a, Esta estrutura mostra um outro tipo de manipulador estudado por [TADEU 97], que também modifica a intensidade dos esforços nas juntas robóticas, melhorando o desempenho dinâmico, o que também a qualifica como opção para utilização de atuadores mais compactos, muito embora não seja estudada neste trabalho.
4. A estrutura paralela modificada, com seis barras é somente uma variação da estrutura paralela tradicional, como ilustrado nas figuras 4.5c. e 4.8d.
5. A estrutura cartesiana ou prismática é ilustrada pelas figuras 4.5b, 4.6c e 4.6d, e trata-se de uma estrutura robótica interessante e de fácil construção e modelagem, embora consiga um menor alcance em relação ao volume ocupado relativamente aos manipuladores de juntas rotacionais, como será mostrado nos itens posteriores.

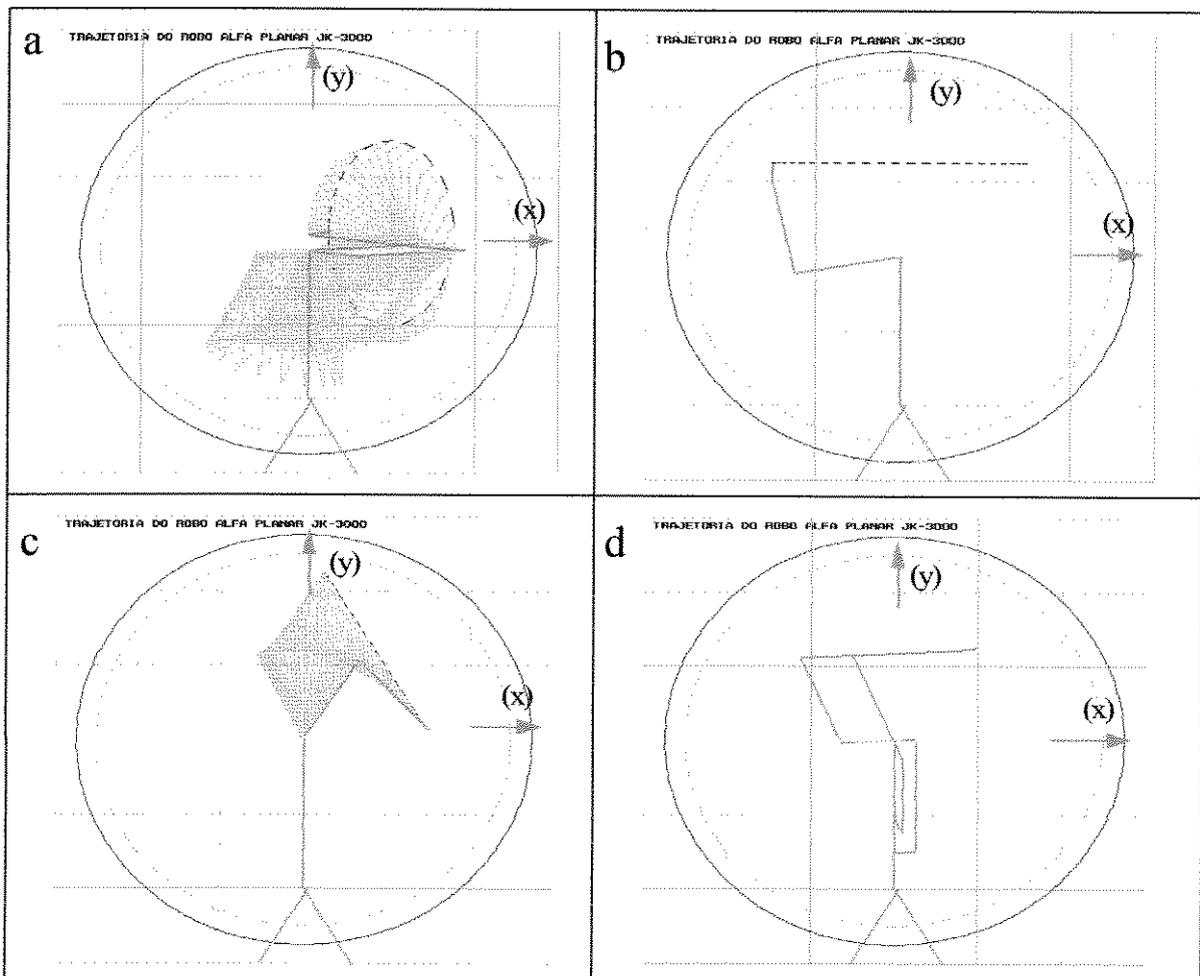


Figura 4.8: Enfatizando os modelos e estruturas dos manipuladores, a) Paralela simples, b) e c) Simples, sem apresentação e com apresentação modificada dos passos, d) Barras paralelas modificado

d) Percurso da Ponta da Garra

A forma adotada para o percurso da garra na execução da tarefa ou a trajetória da garra, está relacionado com a função do manipulador, do ponto de vista do comprador, e como para cada tarefa, este manipulador percorrerá trajetórias diferentes em tempos diferentes, descrevendo perfis cinemáticos, (posições, velocidades e acelerações diferentes), não somente por imposição do operador e do algoritmo de resolução do modelo cinemático mas também pelas exigências de percurso da tarefa, do manipulador, o que leva a modificações dos perfis e valores médio e eficazes de esforços de juntas, influenciando nos critérios da taxa de aquecimento, para seleção de manipuladores. Referenciando-se as figuras 4.1 a 4.8, encontram-se muitos exemplos de trajetórias, que são:

1. reta horizontal, figura 4.6a e 4.8b,
2. reta vertical, figura 4.6b e 4.8d,
3. retas oblíquas, figura 4.1.a, 4.3.a, 4.5c, 4.5d e 4.8c,
4. circular múltipla, figuras 4.2a,
5. arco, figura 4.7.b,
6. elipse, figura 4.5.b e 4.8a,
7. espiral elíptica, figura 4.7a,
8. Cardióide, figuras 4.5a e 4.7d,
9. Cardióide II, figura 4.7c,
10. e espiral circular, figuras 4.6c e 4.6d.

4.2 Provas e Algoritmo de Modelagem Dinâmica Usado.

A modelagem dinâmica, determina os esforços nas juntas que são essenciais para processo de seleção de atuadores. As equações de Euler-Lagrange foram utilizadas para a modelagem dinâmica de manipuladores que foi definida nas seções 2.6 e 2.7 do capítulos 2. Esta última seção citada, trata do programa chamado AMODIRO, que realiza a modelagem dinâmica neste trabalho, apoiado pela programação do anexo A, encarregado da aquisição dos parâmetros e definição do tipo de manipulador desejado para a execução de uma determinada tarefa analisada.

Para que o AMODIRO funcione é necessário que alguns parâmetros se encontrem dispostos numa certa ordem dentro de um banco de dados, a configuração deste banco de dados se encontra disposta no quadro mostrado na figura 4.9, onde: (n) é o número de graus de liberdade do manipulador do qual se pretende obter a solução dinâmica; (Dh) é uma matriz que contém os parâmetros de Denavit Hartenberg; (elo) é uma matriz que contém informações sobre os parâmetros geométricos dos elos tais como centro de massa, massa e momento de inércia, (g) é o vetor que contém as componentes da aceleração da gravidade referidas ao sistema da base, (vtj) é o vetor que informa o tipo de articulação da junta, isto é, rotacional ou prismática.

$$\begin{aligned}
 n &= GL \\
 Dh &= [V\theta[\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_n] \quad V\alpha[\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_n] \quad Va[a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n] \quad Vd[d_1 \ d_2 \ \dots \ d_n]] \\
 elo &= \left[M \begin{bmatrix} M_1 \\ \dots \\ M_n \end{bmatrix} \quad Cm \begin{bmatrix} Cmx_1 & Cmy_1 & Cmx_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ Cmx_n & Cmy_n & Cmx_n \end{bmatrix} \quad J \begin{bmatrix} Jx_1 & Jy_1 & Jz_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ Jx_n & Jy_n & Jz_n \end{bmatrix} \right] \\
 g &= [gx \quad gy \quad gz] \\
 vtj &= [tj_1 \quad tj_2 \quad \dots \quad tj_n] \\
 Tamb &= \theta\alpha \\
 carga &= [Mc \quad Cm[CMcx \quad CMcy \quad CMcz] \quad J[Jcx \quad Jcy \quad jcz]] \\
 Atu &= \left[\begin{array}{ccc} Ma_1 & \dots & Ma_m \\ Cm_1[CMcx \quad CMcy \quad CMcz] & \dots & Cm_m[CMcx \quad CMcy \quad CMcz] \\ J_1[Jcx \quad Jcy \quad jcz] & \dots & J_m[Jcx \quad Jcy \quad jcz] \\ Or_1[Ax \quad Ay \quad Az] & \dots & Or_m[Ax \quad Ay \quad Az] \\ Status_1[S1 \ S2 \ S3 \ S4 \ S5 \ S6 \ S7] & \dots & Status_m[S1 \ S2 \ S3 \ S4 \ S5 \ S6 \ S7] \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

Figura 4.9: Representação algébrica dos dados gerados pelo programa AAMMOVISA.

Os elementos descritos acima são suficientes para a determinação da modelagem dinâmica da estrutura do manipulador isolada, ou seja, livre dos componentes dos atuadores que não são conhecidos no início do processo. Quando se deseja aplicar esta modelagem no processo de seleção de manipuladores, cada vez que um componente de um atuador é selecionado numa junta de ordem superior, seus elementos devem ser integrados na estrutura dinâmica, pois os mesmos contribuem para o aumento da carga dos atuadores das juntas de ordem inferiores.

Para isto, serão utilizados os demais parâmetros do banco de dados, como o (*status*), que indicam a distribuição e localização e orientação deste componentes a estruturas referidas ao sistema de coordenadas dos respectivos elos onde serão incorporados, estes parâmetros. São importantes para a correção do modelo dinâmico que se torna adaptativo com processo de seleção o auxiliado pelo programa AFICESE conforme apresentado na seção 2.9 do capítulo 2.

No programa AFICESE, há um vetor (*carga*) que contém as características geométricas, tais como, o centro de massa e o momento de inércia, como também a massa da carga que eventualmente for conduzida pela garra do manipulador. Estes parâmetros são referidos ao sistema de coordenadas da garra.

A figura 4.9 ilustra a forma e o conteúdo de um banco de dados gerado pelo programa AAMMOVISA para um robô de 3GL do tipo mostrado na figura 4.3a, Este banco de dados deve ter este formato para ser enviado para o programa AMODIRO e ser corretamente interpretado. Outros

exemplos numéricos e práticos deste banco de dados foram listados no anexo B.2, que apresenta as listagens das condições de operações de alguns tipos de robôs, suas tarefas e seus ambientes utilizados neste trabalho.

Uma vez cientes das informações descritas acima, partir-se-á para mostrar duas listagens que ilustram a resposta determinação algébrica de dois manipuladores planares de dois graus de liberdades, um cartesiano e outro articulado com um braço, que são calculados através do programa AMODIRO discutido no capítulo 2 desta tese. Todas estas respostas podem ser comparadas, e se mostram semelhantes as equações similares: 3.1.1 a 3.1.8; 6.4.7; 6.4.20 a 6.4.23; 6.3.10; 6.4.11; 6.4.13; 6.4.18; 6.4.7; 6.4.8; 6.4.2; 6.4.4; 6.4.6; 6.4.9; apresentadas em [SPONG 89] e a interpretação delas em função de serem produzidas pelo aplicativo MATHEMATICA™, pode ser auxiliada pela lista B.1 contida no anexo B que explica a simbologia usada no ambiente daquele aplicativo.

4.2.1.1) Manipulador Planar de 2GL - Dois Graus de Liberdade ROTACIONAL.

a) *As matrizes de transformação homogênea,*

$$T_{[1]} = A_{[1]} = \begin{bmatrix} \cos[q_1[t]] & -\sin[q_1[t]] & 0 & l_1 \cos[q_1[t]] \\ \sin[q_1[t]] & \cos[q_1[t]] & 0 & l_1 \sin[q_1[t]] \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{[2]} = \begin{bmatrix} \cos[q_2[t]] & -\sin[q_2[t]] & 0 & l_2 \cos[q_2[t]] \\ \sin[q_2[t]] & \cos[q_2[t]] & 0 & l_2 \sin[q_2[t]] \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

b) *As Energias Potenciais*

Energia potencial para cada elo

$$V_i = \begin{bmatrix} g y m_1 (-c x_1 \sin[q_1[t]] + l_1 \sin[q_1[t]]) \\ g y m_2 (l_1 \sin[q_1[t]] - c x_2 \sin[q_1[t] + q_2[t]] + l_2 \sin[q_1[t] + q_2[t]]) \end{bmatrix}$$

Considerando $l c_1 = l_1 - c x_1$ e $l c_2 = l_2 - c x_2$

$$V_i = \begin{bmatrix} g y m_1 l c_1 \sin[q_1[t]] \\ g y m_2 (l_1 \sin[q_1[t]] + l c_2 \sin[q_1[t] + q_2[t]]) \end{bmatrix}$$

Energia potencial total

$$V = g y m_1 l c_1 \sin[q_1[t]] + g y m_2 (l_1 \sin[q_1[t]] + l c_2 \sin[q_1[t] + q_2[t]])$$

c) *Os Esforços devido a ação gravitacional*

$$\phi = \begin{bmatrix} g y m_1 l c_1 \cos[q_1[t]] + g y m_2 (l_1 \cos[q_1[t]] + l c_2 \cos[q_1[t] + 2[t]]) \\ g y m_2 l c_2 \cos[q_1[t] + q_2[t]] \end{bmatrix}$$

d) Os Jacobianos

Jacobianos Translacionais

$$J_v = \begin{bmatrix} -(l_1 \sin[q_1[t]]) - l_2 \sin[q_1[t] + q_2[t]] & -(l_2 \sin[q_1[t] + q_2[t]]) \\ l_1 \cos[q_1[t]] + l_2 \cos[q_1[t] + q_2[t]] & -(l_2 \sin[q_1[t] + q_2[t]]) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Jacobianos Rotacionais } J_w = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

e) Os Termos Inerciais

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}$$

$$D_{11} = j_1 + j_2 + l c_1^2 m_1 + l c_2^2 m_2 + l_1^2 m_2 + 2 l c_2 l_1 m_2 \cos[q_2[t]]$$

$$D_{12} = j_2 + l c_2^2 m_2 + l c_2 l_1 m_2 \cos[q_2[t]]$$

$$D_{21} = j_2 + l c_2^2 m_2 + l c_2 l_1 m_2 \cos[q_2[t]]$$

$$D_{22} = j_2 + l c_2^2 m_2$$

f) Os coeficientes de Christoffel

$$C = \begin{bmatrix} C_{ijk}[1,1,1] & C_{ijk}[1,1,2] \\ C_{ijk}[1,2,1] & C_{ijk}[1,2,2] \\ C_{ijk}[2,1,1] & C_{ijk}[2,1,2] \\ C_{ijk}[2,2,1] & C_{ijk}[2,2,2] \end{bmatrix}$$

$$C_{ijk}[1,1,1] = 0$$

$$C_{ijk}[1,1,2] = l c_2 \cdot l_1 \cdot m_2 \cdot \sin[q_2[t]]$$

$$C_{ijk}[1,2,1] = -(l c_2 \cdot l_1 \cdot m_2 \cdot \sin[q_2[t]])$$

$$C_{ijk}[1,2,2] = 0$$

$$C_{ijk}[2,1,1] = -(l c_2 \cdot l_1 \cdot m_2 \cdot \sin[q_2[t]])$$

$$C_{ijk}[2,1,2] = 0$$

$$C_{ijk}[2,2,1] = -(l c_2 \cdot l_1 \cdot m_2 \cdot \sin[q_2[t]])$$

$$C_{ijk}[2,2,2] = C_{ijk}[2,2,2] = 0$$

g) Esforços das Juntas

A resposta à determinação das equações dinâmicas algébricas do manipulador de dois graus de liberdade obtida através do programa AMODIRO é complexa, conforme mostra a lista B.2 do anexo B. Entretanto, após algumas simplificações, e substituição do termo $(li - cxi)$ pelo seu complemento lci , chega-se as equações dinâmicas de cada junta:

$$F[1] = g y m_1 l c_1 \cos[q_1[t]] + g y m_2 (l_1 \cos[q_1[t]] + l c_2 \cos[q_1[t] + 2[t]]) + D_{11} \ddot{q}[1] + D_{12} \ddot{q}[2] + C_{121} \dot{q}[1] \dot{q}[2] + C_{211} \dot{q}[1] \dot{q}[2] + C_{221} \dot{q}^2[2]$$

$$F[2] = g y m_2 l c_2 \cos[q_1[t] + q_2[t]] + D_{21} \ddot{q}[1] + D_{22} \ddot{q}[2] + C_{112} \dot{q}^2[1]$$

Com este resultado se pode dizer que o programa AMODIRO tem uma boa resposta, apesar de não simplificada em função do tempo de execução, pois é mais rápido simplificar os resultados numéricos do que a equação algébrica, compare e veja que os resultados abaixo são semelhantes aos encontrado por [SPONG 89], e portanto mostra que o programa tem um funcionamento correto com relação a este aspecto.

4.2.1.2) Manipulador Planar de 2GL - Dois Graus de Liberdade, CARTESIANO.

a) Matrizes de Transformação Homogêneas

Matrizes de Transformação Homogêneas Elementares

$$A[[1]] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_1[t] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A[[2]] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & q_2[t] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrizes de Transformação Homogêneas dos elos para a base

$$T[[1]] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_1[t] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T[[2]] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & q_2[t] + q_2[t] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

b) Energia potencial total,

$$V = g z m_1 q_1[t] + g z m_2 q_1[t],$$

c) Esforços devido ação gravitacional para cada junta.

$$\phi = \begin{bmatrix} g z m_1 + g z m_2 \\ 0 \end{bmatrix},$$

d) Jacobianos,

$$\text{Jacobianos translacionais} \quad Jv[1] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad Jv[2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Jacobianos rotacionais} \quad Jw[1] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad Jw[2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

e) Matriz dos termos inerciais

$$Dij = \begin{bmatrix} m1.m2 & 0 \\ 0 & m2 \end{bmatrix},$$

f) Símbolos de Christoffel, $Cijk =$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

g) Esforços resultantes,

$$FR = \begin{bmatrix} gz m1 + gz m2 + (m1 + m2) ddq[1] \\ m2 ddq[2] \end{bmatrix}$$

Assim, comparando os resultados do programa AMODIRO, para as condições e modelo de manipulador, com aqueles resultados descritos por [SPONG 89], verifica-se serem semelhantes, e portanto, se para estas condições, manipuladores e graus de liberdade, valem ele produz respostas equivalentes as esperadas, e pré-determinadas na bibliografia, espera-se que este programa produza resultados válidos para outros manipuladores e condições, o que se mostrado à frente para simulação de esforços de juntas, para problemas conhecidos.

4.2.1.3) Modelo Dinâmico Manipulador Espacial JECA II.

O programa AMODIRO com o auxílio do programa AFICESE, realizam modelagem dinâmica e determinam as equações dinâmicas algébricas ou numéricas também das juntas dos manipuladores espaciais. Por esta razão, estes programas foram também empregados para a determinação do modelo dinâmico da cadeia de posicionamento do robô JECA II, que não será apresentada nesta tese por causa da resposta ser muito extensa em função da não simplificação e depois por não ter sido comparada com outra. Entretanto, alguns passos básicos e preparativos para esta modelagem estão relatados em [SILVA, 98o].

4.2.2 Resposta Numérica dos Esforços por Juntas.

Nesta seção, será simulado o manipulador planar de três graus de liberdade e as condições apresentadas na figura 4.1, e os perfis cinemáticos determinados naquela situação serão utilizados para gerar as equações dinâmicas das juntas daquele manipulador que serão determinadas com a utilização do programa de modelagem dinâmica AMODIRO utilizando 20 e 50 pontos de amostragens em 5

segundos. Depois disto, estes perfis de esforços assim obtidos, serão comparados com aqueles de [LATRE 92]. As características do ambiente e condições do manipulador deste modelo são estabelecidas na tabela 4.1, e pelo banco de dados característico da listagem B.3 contida no anexo B. Não entrando nos detalhes dos perfis cinemáticos que não são os ideais, como a aceleração que não se anula em função do não cálculo e nem apresentação dos últimos pontos da tarefa, pode-se ver que a resposta dos perfis produzido pelas equações geradas pelo programa AMODIRO, são idênticos aos perfis apresentados por [LATRE, 89], confirmando mais uma vez as expetativas com relação a validade deste programa.

Neste trabalho, para geração dos perfis dinâmicos de um determinado robô realizando uma determinada tarefa dentro de uma certa condição e ambiente, é necessário conhecer os perfis cinemáticos, e ter o modelo dinâmico da estrutura em função de velocidades acelerações e posições angulares das juntas. O modelo dinâmico pode ser determinado de duas maneiras. Uma forma é usada quando não se conhece o modelo dinâmico do atuador. Neste caso o modelo algébrico é gerado através do programa AMODIRO, que o envia a um arquivo de nome ESFORÇO. A segunda forma é usada quando se tem o modelo algébrico escrito, e consiste em escrevê-lo no arquivo ALSIMOPLA, veja capítulo 2, e anexo A.

Ordem	Item	Descrição do item
a	Número de pontos de amostragem	20 ou 50 pontos
b	Tipo de garra	Simples
c	Tipo de robô	Cotovelo planar
d	Perfil de Tempo	Não importa
e	Centro de massa	Ponta do elo
f	Algoritmo cinemático	trechos de rampas, parábolas e constantes
g	Cinemática	Cotovelo acima
h	Estrutura	Simples tipo cotovelo
i	Modelo Dinâmico	Adaptativo, programa AMODIRO, [SPONG 89] Não Adaptativo, programa ALSIMOPLA, [GIMENO 88]
j	carga na garra	nula
k	trajeto	reta ligando (-0.9 , 0.4, 0.0) a (0.5 , 0.9, 0.0)
l	comprimento da elo 1	50 [cm]
m	comprimento da elo 2	50 [cm]
n	comprimento da garra	10 [cm]
o	tempo de percurso, ou tarefa	5[s]
p	Orientação da garra	variando de 135° até 90°
q	classe do robô	SSS-RRR-xxx-123
r	graus de liberdade	3 GL

Tabela 4.1: Condições e características do manipulador de [LATRE 88]

Os perfis cinemáticos com 20 e 50 pontos de amostragem, também são produzidos com o apoio do programa AAMMOVISA, juntamente com a escolha e simulação do tipo de robô. O uso de 20 pontos, visa facilitar a comparação com os resultados apresentados em [LATRE 92], e os resultados de 50 pontos de amostragem são para mostrar que a resposta não diverge tanto, apesar de mostrar curvas um tanto quanto mais suaves por causa do número de pontos de amostragem adotados. Isto será mostrado através dos gráficos das próximas figuras, que são obtidos através de dois programas auxiliares, o RAVIPECI - Rotina de Apresentação Visual da Equações Cinemáticas, e o RAVEDI - Rotina de Apresentação Visual das Equações Dinâmicas. No final da seção A.3.

Estes dois programas ou rotinas, são iterativos e calculam os esforços de cada junta em cada tempo de amostragem. Para todas as curvas mostradas nesta seção, as curvas que representam os resultados do lado esquerdo são gráficos com 20 pontos de amostragem, aqueles do lado direito representam os resultados com 50 pontos de amostragem.

Nas figuras referentes as respostas dinâmicas, os gráficos do lado de cima são obtidos através do modelo não adaptativo contido no programa ALSIMOPLA, contendo o modelo de [LATRE, 89], e os gráficos de baixo, foram obtidos através do modelo adaptativo, através do programa AMODIRO, com princípio de modelagem baseado na modelagem de [SPONG 89].

As respostas ao modelo cinemático, posição, velocidade e aceleração relativas das juntas obtidas através do programa AAMMOVISA são mostradas através dos gráficos da figura 4.1b, 4.1c e 4.1d, são idênticas ou próximas das figuras obtidas pelo programa SIGECOSAN e apresentadas com o auxílio do programa RAVEDI como ilustrado respectivamente pelas figuras 4.10, 4.11 e 4.12.

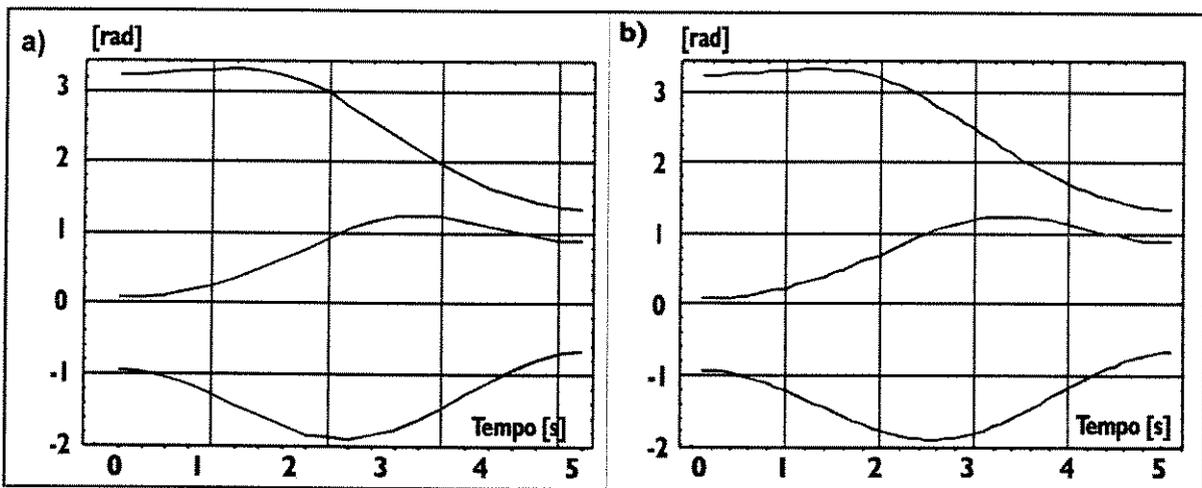


Figura 4.10: Posições angulares das três juntas para o manipulador modelado por [LATRE 88]: a) para vinte pontos de amostragem b) para cinquenta pontos de amostragem

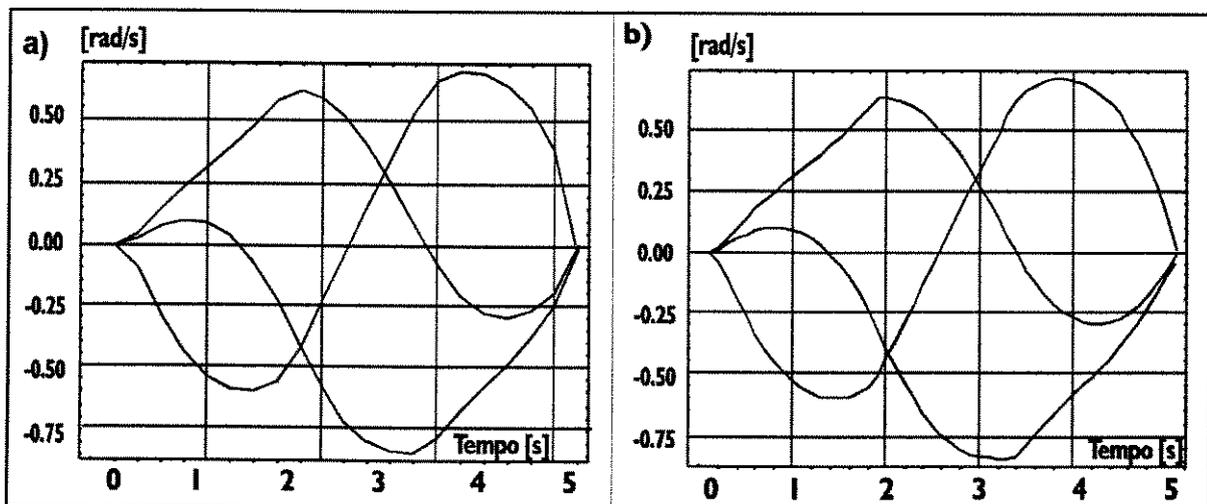


Figura 4.11: Velocidades angulares das três juntas para o manipulador modelado por [LATRE 88] a) para vinte pontos de amostragem b) para cinquenta pontos de amostragem

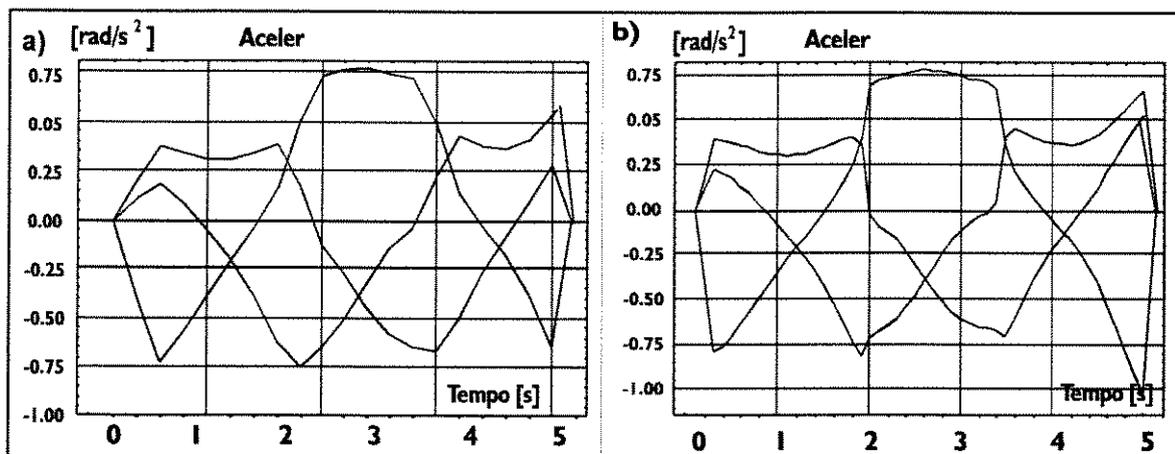


Figura 4.12: Acelerações angulares das três juntas para o manipulador modelado por [LATRE 88]: a) para vinte pontos de amostragem b) para cinquenta pontos de amostragem

Respostas Dinâmicas: Na análise dos esforços produzidos, pode-se perceber a grande vantagem da programação de modelagem dinâmica desenvolvida nesta tese que é adaptativa em relação à equação proposta por [LATRE 92], porque este programa pode produzir as mesmas respostas obtidas pelas equações daquele autor, mas permite o acesso de mais parâmetros do manipulador que podem ser adaptados ou modificados com decorrer do processo e que ficam embutidos ou nem são considerados na equação ou **modelo não adaptativo** de [LATRE 92]. Os gráficos das figuras 4.13 a 4.14, caracterizam-se também pela mudança do centro de massa da ponta dos elos, cujas respostas são mostradas nas figuras de índice *a* e *b* para o meio dos respectivos elos conforme figuras de índices *c* e *d*, e pode-se ver que os esforços das juntas caíram significativamente. Esta mudança é impossível de ser feita nas equações de [LATRE 92].

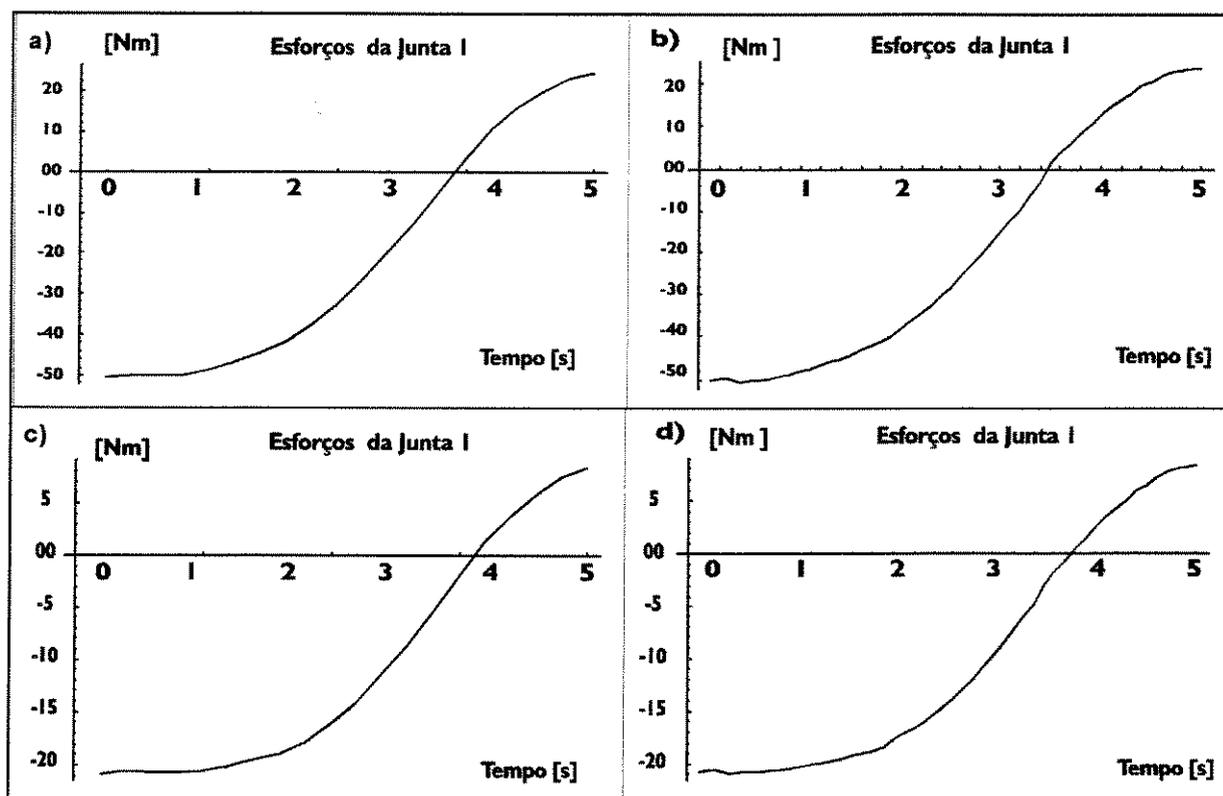


Figura 4.13: Esforços da Junta I, usando em a) e b) Modelo não adaptativo, e c) e d) Modelo adaptativo.

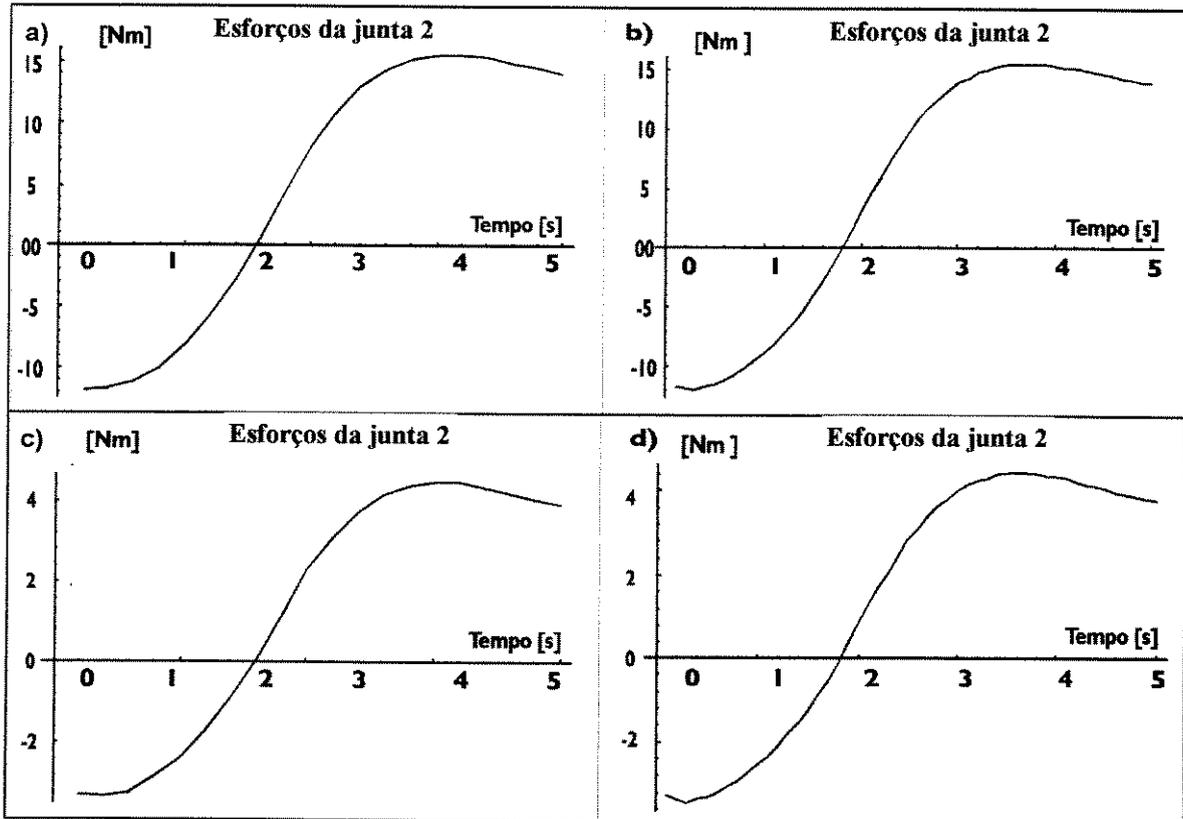


Figura 4.14: Esforços da Junta 2, usando em a) e b) Modelo não adaptativo, e c) e d) Modelo adaptativo.

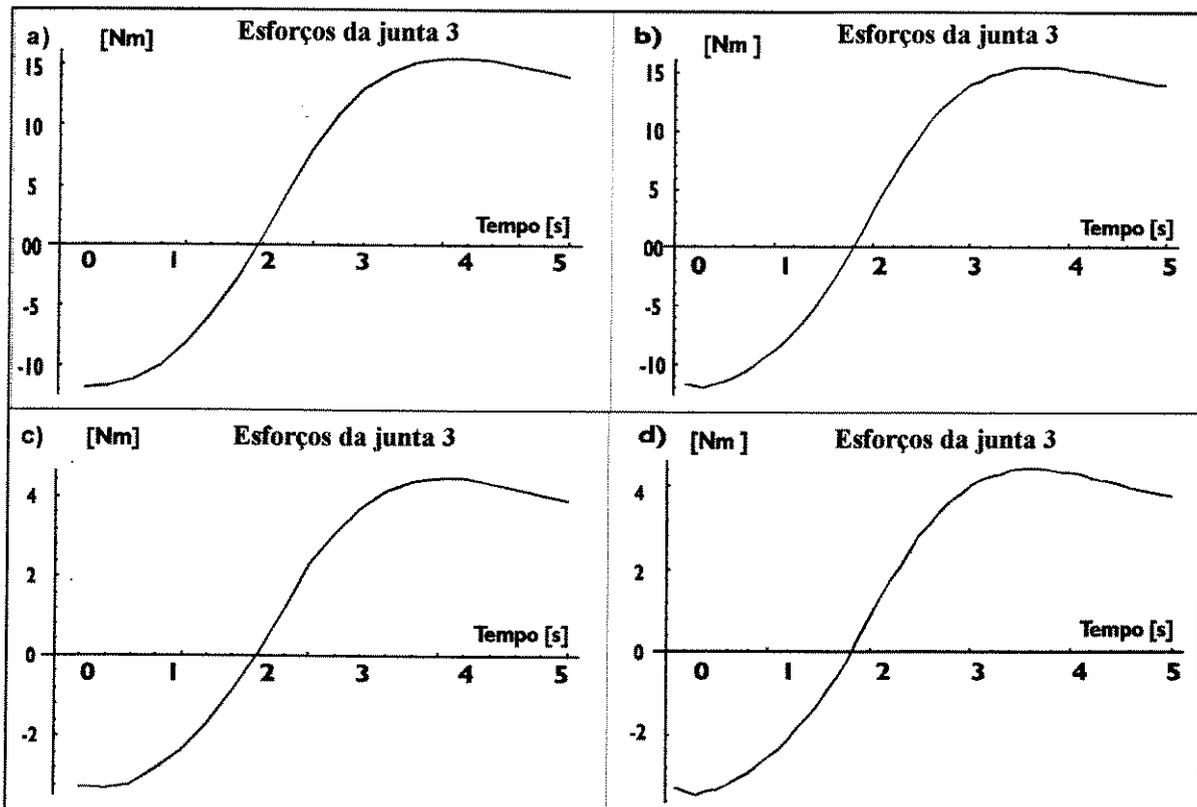


Figura 4.15: Esforços da Junta 3, usando em a) e b) Modelo não adaptativo, e c) e d) Modelo adaptativo.

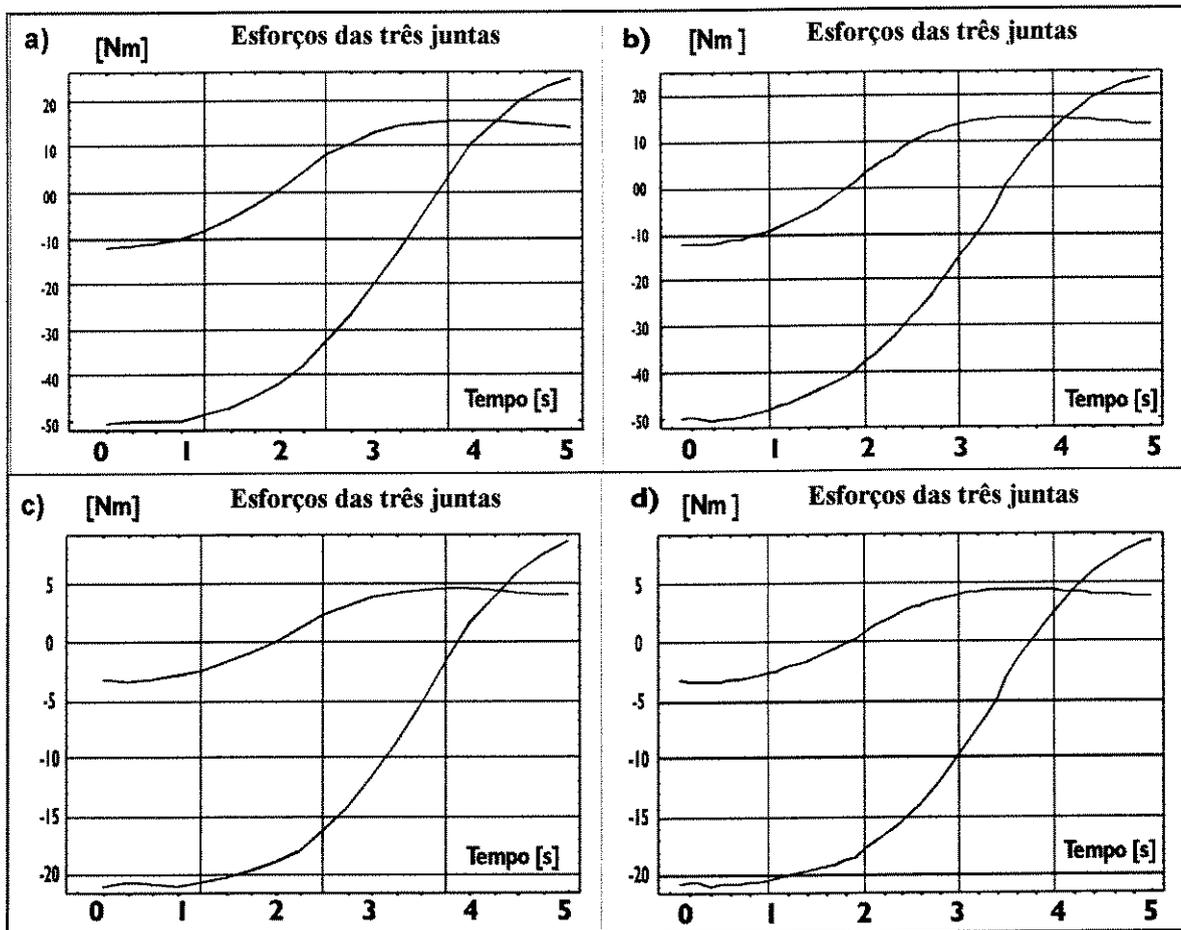


Figura 4.16: Esforços das três Juntas, usando em a) e b) Modelo não adaptativo, e c) e d) Modelo adaptativo.

Aqui foram analisados, a precisão das respostas dinâmicas enfatizando, a origem dos modelos, e o número de pontos de amostragem da simulação. Foi constatado que as respostas dinâmicas geradas usando o modelo dinâmico desenvolvido neste trabalho utilizando método das equações de Euler Lagrange descrito por [SPONG 89], comparada com as respostas produzidas pela simulação das equações dinâmicas apresentadas em [LATRE 92] que são não adaptativas, independente do número de pontos de amostragem da simulação, para as mesmas condições, e as pequenas diferenças que poderiam existir, são atribuídas às simplificações do modelo de [LATRE 92], mas confirma a mudança da intensidade dos esforços com a mudança do situação dos centros de massas dos elos, procedimento para o qual as equações de [LATRE, 92] são insensíveis, confirmando seu caráter não adaptativo para estas alterações.

Esta análise nos permite afirmar mais uma vez que se o modelo é válido para manipuladores planares de até 3 graus de liberdade, e portanto poderia ser estendido para manipuladores espaciais com mais de três graus de liberdade.

4.3 Resposta aos Principais Fatores que Influem na Resposta Dinâmica.

A existência dos atuadores influencia no modelo dinâmico, ou pela ação que eles produzem, ou pela simples presença, distribuição de carga ou existência como massa para a formação da estrutura do próprio elo acionado ou de outro na cadeia cinemática do robô.

O conhecimento dos esforços das juntas para um determinado robô, uma determinada tarefa, num determinado ambiente, depende da modelagem dinâmica usada acima. A capacidade do atuador é determinada de uma ou outra forma, influenciada diretamente pela intensidade de esforço requerida pela carga (ele juntamente com seus componentes, que pode incluir parte do atuador seu de outro elo).

Assim, baseado nesta duas informações, se pode afirmar que a existência do atuador modificam o modelo dinâmico da junta, e que a intensidade dos esforços calculados com o auxílio do modelo dinâmico da junta, influenciados pela presença de atuadores, da carga, e dos elos superiores na estrutura e a distribuição deles, influi na escolha do atuador. Por isto é importante que façamos uma análise de alguns fatores que influem na resposta dinâmica. Tais como:

- As localizações dos centros de massas dos elos dos manipuladores.
- A utilização da compensação do desequilíbrio de torque de gravidade, ou massa em torno dos eixos, dos elos.
- A quantidade de massa em torno dos eixos.
- As Realocação dos atuadores para compensação de desequilíbrio.
- Diferentes distribuições de atuadores conforme a configuração do sistema de acionamento.
- Os algoritmos cinemáticos de manipulador.
- Diferentes Formas de tarefas.
- Diferentes perfis de variação de tempo.
- Mudança do tempo de execução da tarefa.
- A adaptabilidade do modelo dinâmico.
- Diferentes cargas ou esforços feitos pela garra do manipulador.

4.3.1 Localizações dos Centros de Massa dos Elos do Manipilador

Como já foi mostrado no capítulo 3, que as escolha do motor depende do valor de pico e eficaz do torque solicitado pela junta. Boa parte do torque $T = m g l c \cos(\theta)$, solicitado no eixo do elo, depende da massa m e direção do elo $\cos(\theta)$ no campo de aceleração gravitacional g , e da localização lc do centro de massa ao eixo. Portanto, quanto menor for a distância do centro de massa ao eixo menor o torque exigido do motor, e menos robusto ele precisará ser.

Assim, se for conseguido influenciar na localização do centro de massa, se pode influenciar também no tamanho do atuador requerido para realizar uma determinada tarefa no campo gravitacional. Isto não vale para um robô trabalhando em órbita, queda livre, sobre um campo gravitacional desprezível ou nulo. Nas três subseções que seguem será mostrada a influência da localização do centro de massa nas características geométricas e esforços dos eixos.

4.3.1.1 Alterações nos Esforços Decorrentes da Posição dos Centros de Massa dos Elos

Aqui será mostrado uma simulação de um manipulador, tarefa, e condições descritas na tabela 4.2, visando analisar o deslocamento dos centros de massas, das estruturas dos elos, em três posições na extensão do elo daquele manipulador simples mostrado na figura 4.1. O banco de dados gerado para esta análise, é estabelecido conforme a listagem B.2, do anexo B, e o resultado são as curvas mostradas nas figuras 4.18 a 4.21, que mostram respectivamente os esforços para as juntas, 1, 2, garra, isolados e depois associados, onde nas curvas da esquerda para a direita, o centro de massa fica, na ponta, no meio e no centro do elo.

Ordem	Item	Descrição do item
a	Número de pontos de amostragem	50 pontos
b	Tipo de garra	Simple
c	Tipo de robô	Cotovelo planar
d	Perfil de Tempo	Não importa
e	Centro de massa	Ponta do elo - Metade do elo - Eixo do elo
f	Algoritmo cinemático	Aproximação polinomial
g	Cinemática	Cotovelo acima
h	Estrutura	Simple tipo cotovelo
i	Modelo Dinâmico	Adaptativo gerado pelo programa (AMODIRO)
j	carga na garra	nula
k	trajeto	reta ligando (-0.3 , 0.9, 0.0) a (0.8 , 0.1, 0.0)
l	comprimento da elo 1	50 [cm]
m	comprimento da elo 2	50 [cm]
n	comprimento da garra	10 [cm]
o	tempo de percurso, ou tarefa	5[s]
p	Orientação da garra	variando de 135° até 10°
q	classe do robô	SSS-RRR-DDD-123
r	graus de liberdade	3 GL

Tabela 4.2: condições e características do manipulador para análise do deslocamento do centro de massa.

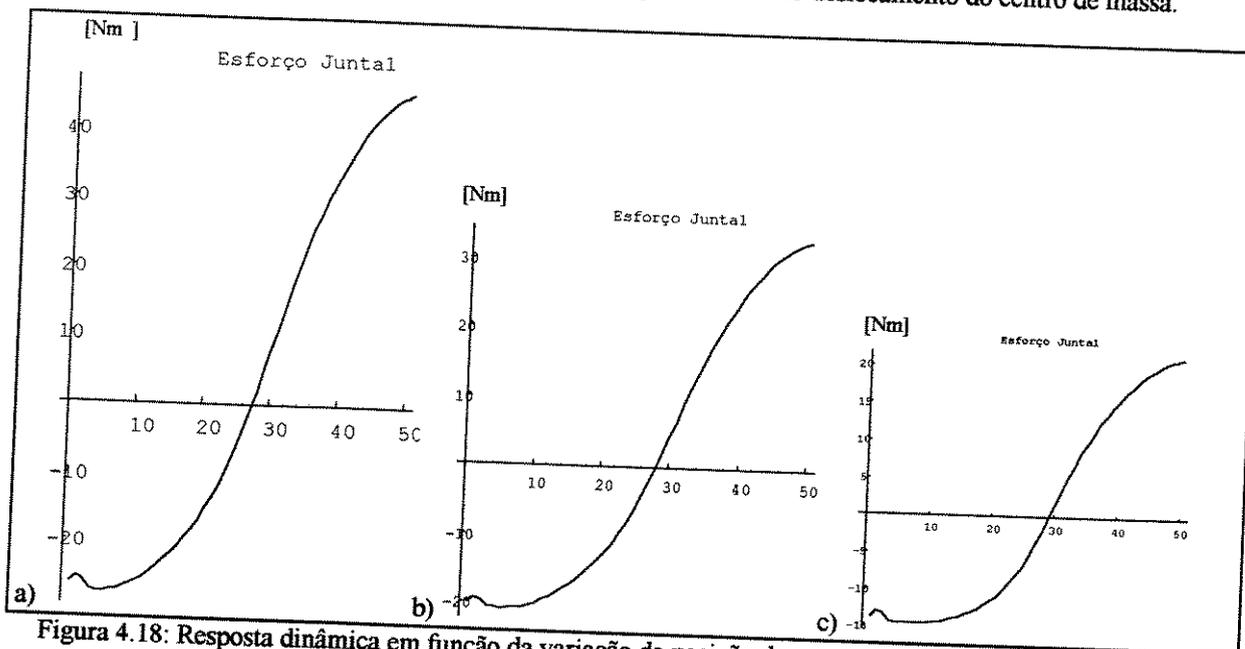


Figura 4.18: Resposta dinâmica em função da variação da posição dos centros de massa dos elos na junta 1: centro de massa a) na ponta b) metade c) no eixo das juntas dos elos.

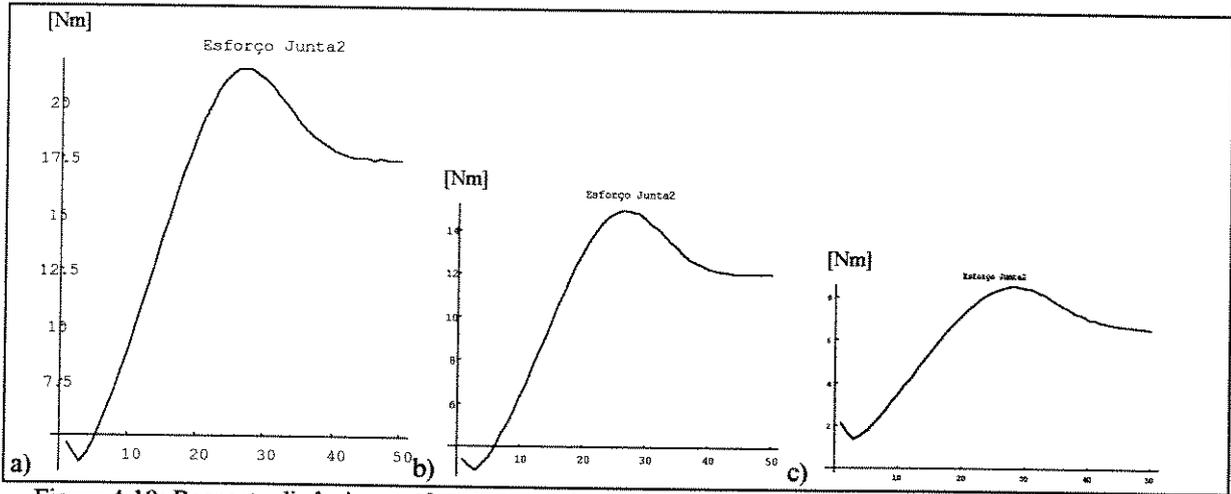


Figura 4.19: Resposta dinâmica em função da variação da posição dos centros de massa dos elos na junta 2: centro de massa a) na ponta b) metade c) no eixo das juntas dos elos.

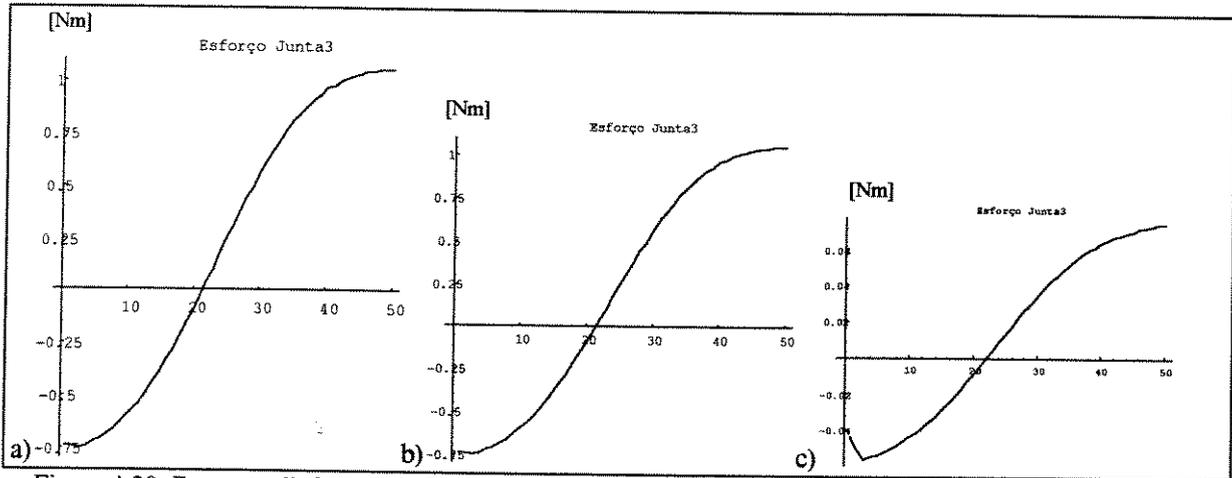


Figura 4.20: Resposta dinâmica em função da variação da posição dos centros de massa dos elos na junta 3: centro de massa a) na ponta b) metade c) no eixo das juntas dos elos.

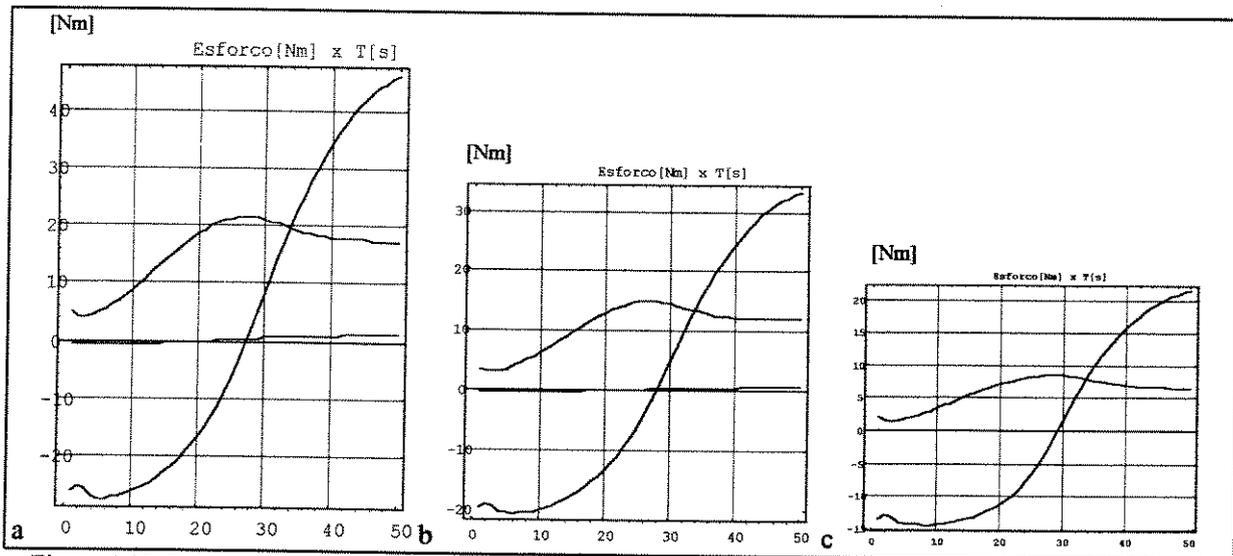


Figura 4.21: Resposta dinâmica em função da variação da posição dos centros de massa dos elos para as três juntas: centro de massa a) na ponta b) metade c) no eixo das juntas dos elos.

Como se pode verificar, quanto mais no extremo, o centro de massa do elo ficar, mais intenso será o esforço requerido pela junta do motor que a aciona. O que vem confirmar o que foi dito anteriormente.

Foi visto no capítulo 2, e em [SILVA,98o], que a localização do centro de massa, é influenciada pela compensação do desequilíbrio de massas em torno dos eixos das junta, diminui o momento gravitacional e aumenta os momentos inerciais, para robôs trabalhando em campo gravitacional. A compensação de desequilíbrio como foi vista, pode ser **total**, se conseguirmos compensar todas as massas inclusive de outros elos, pode ser **parcial**, se compensarmos apenas parte desse desequilíbrio, se pode dizer compensação **dinâmica**, quando se pode compensar o peso da carga suportada pela garra do manipulador.

4.3.1.2 Compensação do Desequilíbrio de Momento Gravitacional em Torno do Eixo

Foi feito um programa que calcula o aumento de massa em cada elo de um manipulador, quando se faz compensação de desequilíbrio total e parcial, em torno dos eixos das juntas. E o resultado disto será apresentado através de tabelas montadas a seguir. Cada linha das tabelas corresponde a um eixo, e cada coluna contém um fator que deve ser multiplicado pela massa do elo correspondente apresentada na primeira linha, a soma destes produtos em cada coluna determina a massa total acionada para aquele eixo independente da distância em que fica do mesmo.

As tabelas foram construídas para um manipulador planar de juntas rotacionais, com cinco graus de liberdade, sem carga na garra, de elos com comprimentos iguais, compensados com uma haste de compensação que se estende no sentido oposto dos elos em torno da junta, com a finalidade de sustentar um contrapeso para a carga suportada pelo elo e compensar a estrutura do próprio elo, logo, deve conter as mesmas características dos seus respectivos elos.

A tabela 4.3, mostra que a concentração de massas nos eixos de cada junta do manipulador antes de haver compensação do desequilíbrio. Cada eixo suporta a massa de seu próprio elo, e mais as massas da estrutura dos elos de ordem superior, até a massa da carga da garra se ela existisse.

A tabela 4.4, mostra que a concentração de massas para compensação do desequilíbrio de momento gravitacional em torno de cada eixo após a compensação total, incluindo os acréscimos devido aos pesos das hastes de compensação e do contrapeso.

A tabela 4.5, mostra que a concentração de massas para compensação do desequilíbrio de momento de gravidade em torno de cada eixo, após a compensação total, devido somente as contribuições dos contrapesos.

A tabela 4.6, mostra que a concentração de massas para compensação do desequilíbrio de momento de gravidade em torno de cada eixo após a compensação total, devido as contribuições das massas dos elos e das extensões usadas para compensações. Verificar que com a compensação, ocorre o aumento significativo das massas em torno das juntas. Entretanto, se o comprimento das hastes de compensação for reduzido, as massas deverão ser aumentadas muito mais.

Numa outra simulação, foi feita uma simulação para para as hastes de compensação são dez vezes menor que as hastes de ação, inseriu-se uma **carga de massa m_6** , na ponta da garra deste mesmo atuador, e verificou-se que o acréscimo na massa sustentada pelo eixo da junta da base, para compensar a **massa estática da carga**, chega a ser da ordem de 10^5 vezes o valor desta massa.

Massa do elo	m1	m2	m3	m4	m5
Eixo 1	1	1	1	1	1
Eixo 2	0	1	1	1	1
Eixo 3	0	0	1	1	1
Eixo 4	0	0	0	1	1
Eixo 5	0	0	0	0	1

Tabela 4.3: Fatores de multiplicação das massas de cada elo em cada eixo, antes da compensação

Massa do elo	m1	m2	m3	m4	m5
Eixo 1	1	2	4	8	16
Eixo 2	0	1	2	4	8
Eixo 3	0	0	1	2	4
Eixo 4	0	0	0	1	2
Eixo 5	0	0	0	0	1

Tabela 4.4: Fatores de multiplicação da massa total de haste mais contrapeso, em função das massas cada elo em cada eixo.

Massa do elo	m1	m2	m3	m4	m5
Eixo 1	0	2	4	8	16
Eixo 2	0	0	2	4	8
Eixo 3	0	0	0	2	4
Eixo 4	0	0	0	0	2
Eixo 5	0	0	0	0	0

Tabela 4.5: Fatores de multiplicação da massa total somente do contrapeso, em função das massas cada elo em cada eixo.

Massa do elo	m1	m2	m3	m4	m5
Eixo 1	2	4	8	16	32
Eixo 2	0	2	4	8	16
Eixo 3	0	0	2	4	8
Eixo 4	0	0	0	2	4
Eixo 5	0	0	0	0	2

Tabela 4.6: Fatores de multiplicação de massas total de cada elo (elo + haste + contrapeso) em cada eixo, após a compensação de desequilíbrio.

4.3.1.2) Realocação dos Atuadores para Compensação de Desequilíbrio

Nem sempre é viável a compensação total do desequilíbrio em torno dos eixos de um manipulador, o aumento excessivo de massa, intensifica os esforços inerciais requeridos pelo manipulador até haver um ponto em que isto não vale a pena técnica e financeiramente, e o aumento do comprimento da haste de compensação, altera a liberdade da junta, e reduz volume de trabalho do manipulador, podendo tornar-se tecnicamente inviável. Em vista destes problemas, o que normalmente pode-se fazer é distribuir as cargas da estrutura dos elos do manipulador reduzindo seu peso e jogando parte dela, como os componentes dos atuadores, como redutores, transmissões, motores e *encoders*, amplificadores, para fora ou para a haste de compensação. Assim, numa nova simulação mostrar-se-á a influência da posição ou colocação estrutural dos atuadores nos elos.

A análise da influência da posição dos atuadores nos esforços requeridos pelas juntas será mostrada, utilizando-se do modelo compensado onde, o motor será colocado em diversas posições da estrutura, da ponta dos elos até a haste de compensação, mostrando a utilização dos atuadores e seus componentes como partes dos contrapesos, como indicado pela figura 4.22. As condições do manipulador e tarefa são indicadas na tabela 4.7, e listagem de dados B.3 do anexo B.

Baseado nos dados citados, fez-se as simulações dinâmicas usando o programa AMODIRO e teve-se como resultado os gráficos apresentados nas figuras 4.23 a 4.26. O item (a) refere-se estrutura isolada do manipulador ou sem os atuadores; itens (b) são para motores e redutores situados na haste de ação, respectivamente a 15% e 30% em relação ao comprimento do elo dos eixos das juntas onde estão fixados na estrutura, itens (c) são para motores e redutores situados na haste de ação, respectivamente a 90% e 75% em relação ao comprimento do elo dos eixos das juntas onde estão fixados na estrutura, e itens (d) são para motores e redutores situados na haste de compensação, respectivamente, a 60% e 45% em relação ao comprimento do elo dos eixos das juntas onde estão fixados na estrutura,

Ordem	Item	Descrição do item
a	Número de pontos de amostragem	50 pontos
b	Tipo de garra	Simple
c	Tipo de robô	Cotovelo planar
d	Perfil de Tempo	Não importa
e	Centro de massa	Metade do elo
f	Algoritmo cinemático	Aproximação polinomial
g	Cinemática	Cotovelo acima
h	Estrutura	Simple tipo cotovelo
i	Modelo Dinâmico	Adaptativo gerado pelo programa (AMODIRO)
j	carga na garra	nula
k	trajeto	reta ligando (-0.3 , 0.9, 0.0) a (0.8 , 0.1, 0.0)
l	comprimento da elo 1	50 [cm]
m	comprimento da elo 2	50 [cm]
n	comprimento da garra	10 [cm]
o	tempo de percurso, ou tarefa	5[s]
p	Orientação da garra	variando de 135° até 10°
q	classe do robô	SSS-RRR-III-123
r	graus de liberdade	3 GL
s	atuadores	presentes

Tabela 4.7: condições e características do manipulador para análise do deslocamento do centro de massa.

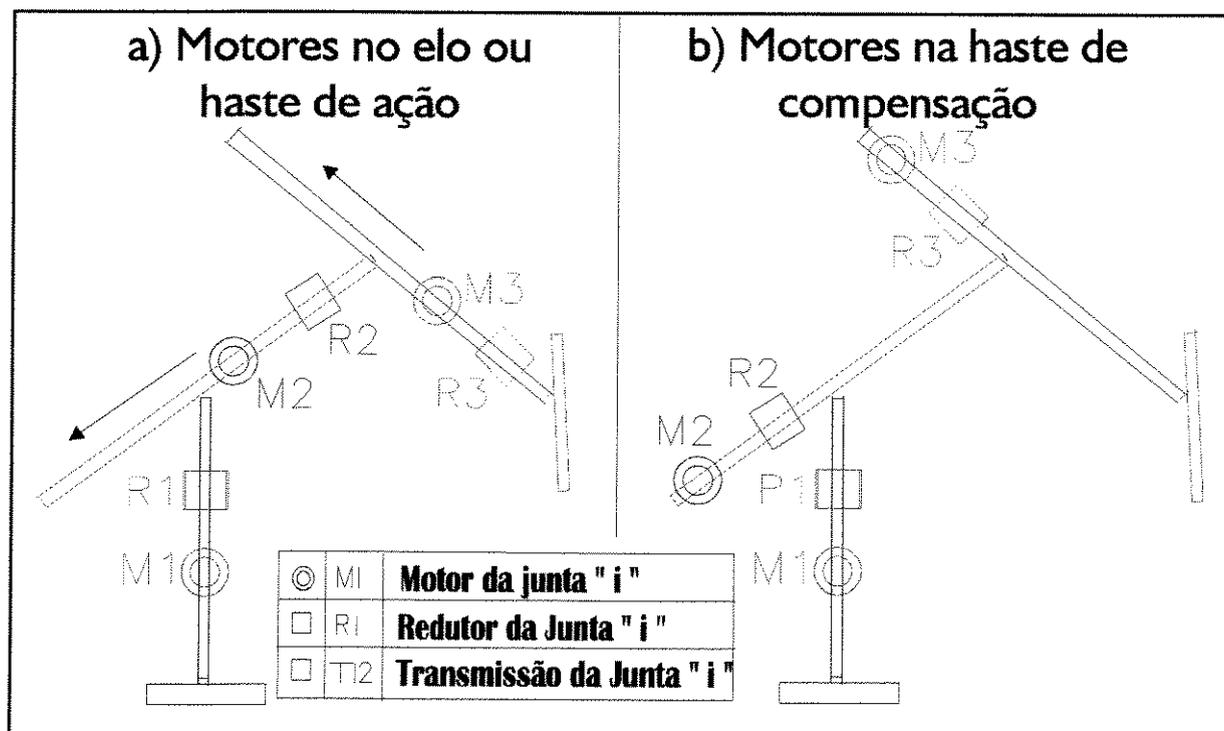


Figura 4.22: Deslocamento dos atuadores na estrutura de um manipulador para verificação de esforços.

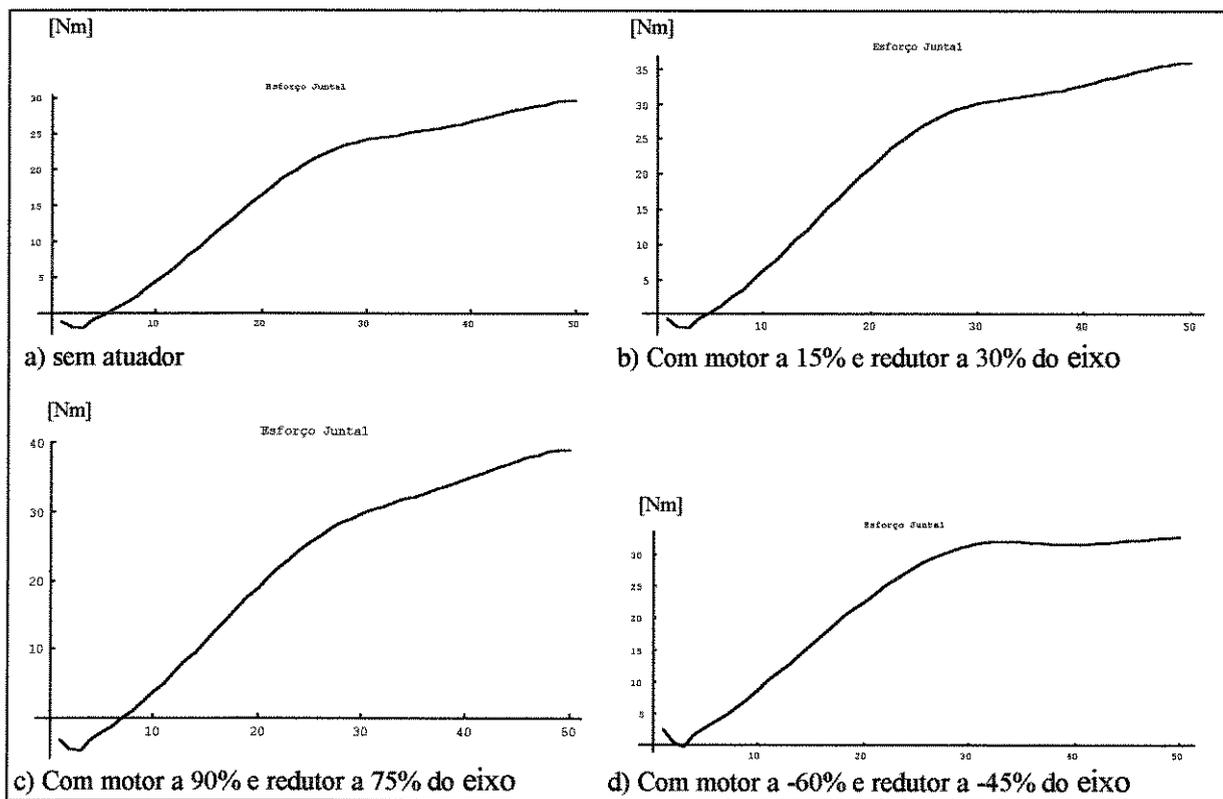


Figura 4.23: Esforços da junta 1, para diversas posições dos motores, relativas ao comprimento do elo 1.

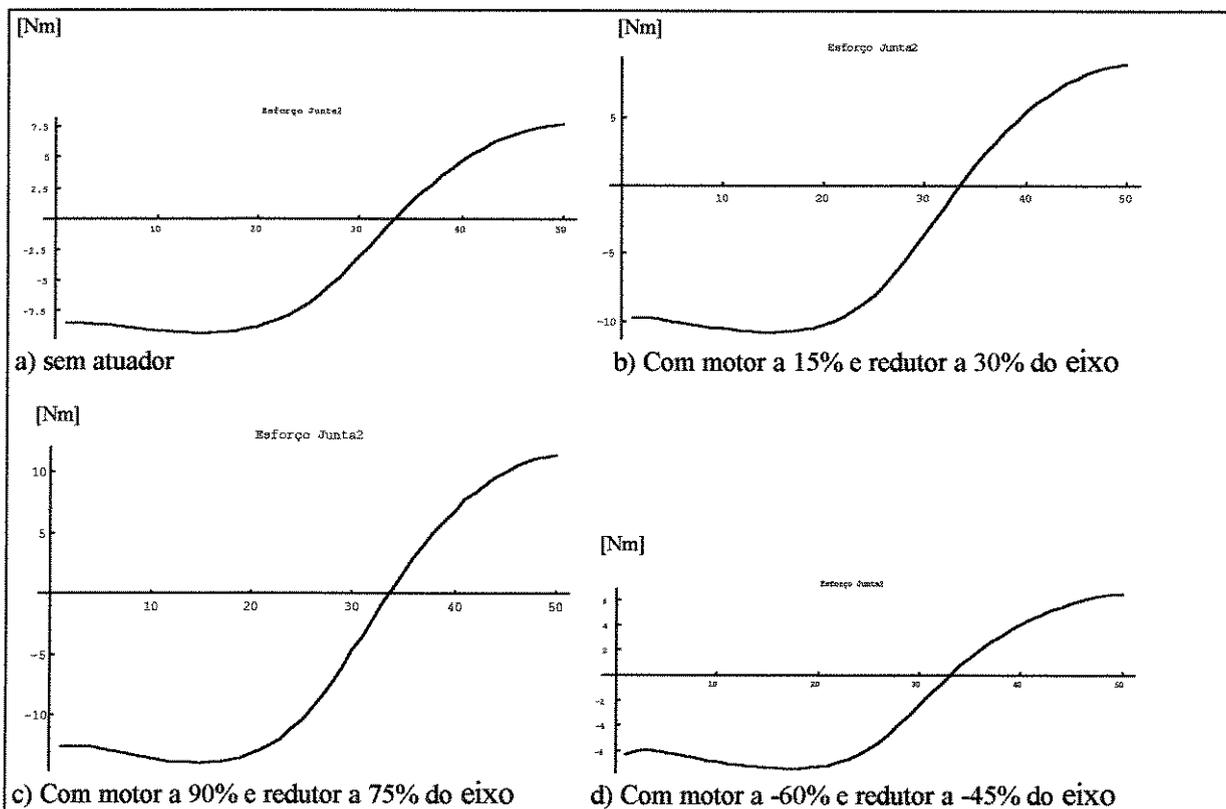


Figura 4.24: Esforços da junta 2 em [Nm], para diversas posições dos motores distribuídos no elo 2.

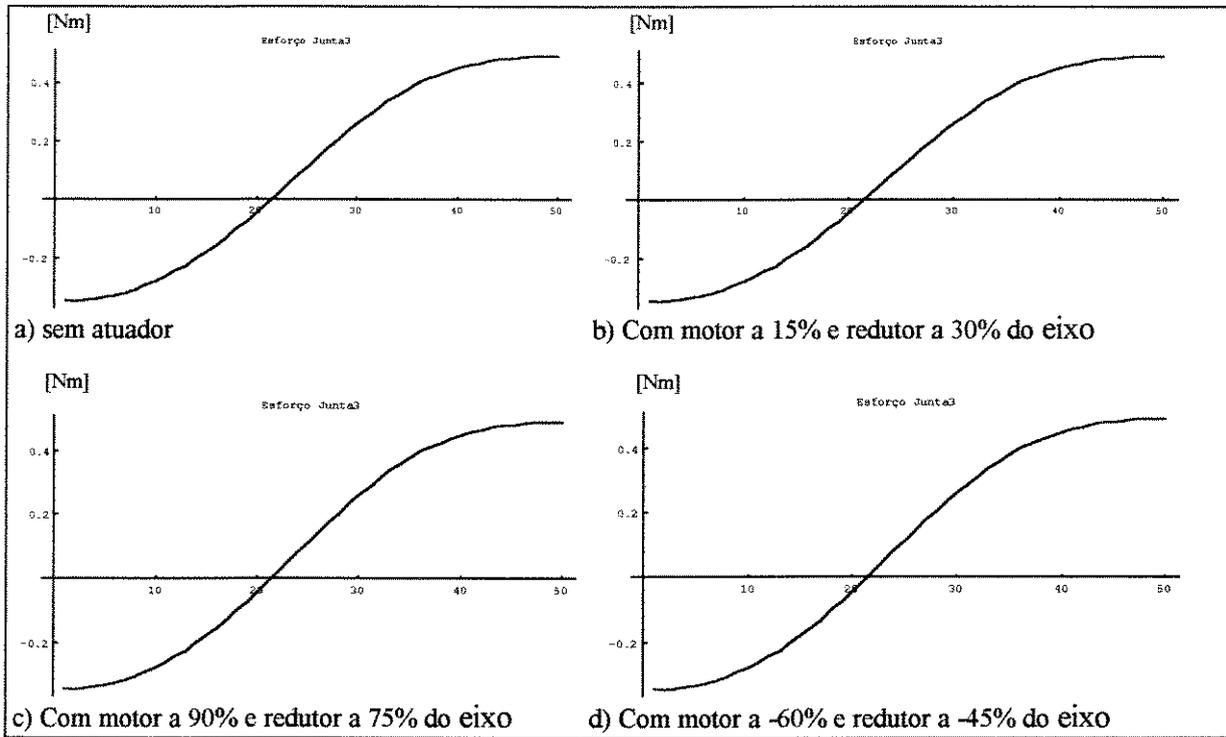


Figura 4.25: Esforços da junta 3 em [Nm], para diversas posições dos motores distribuídos no elo 3.

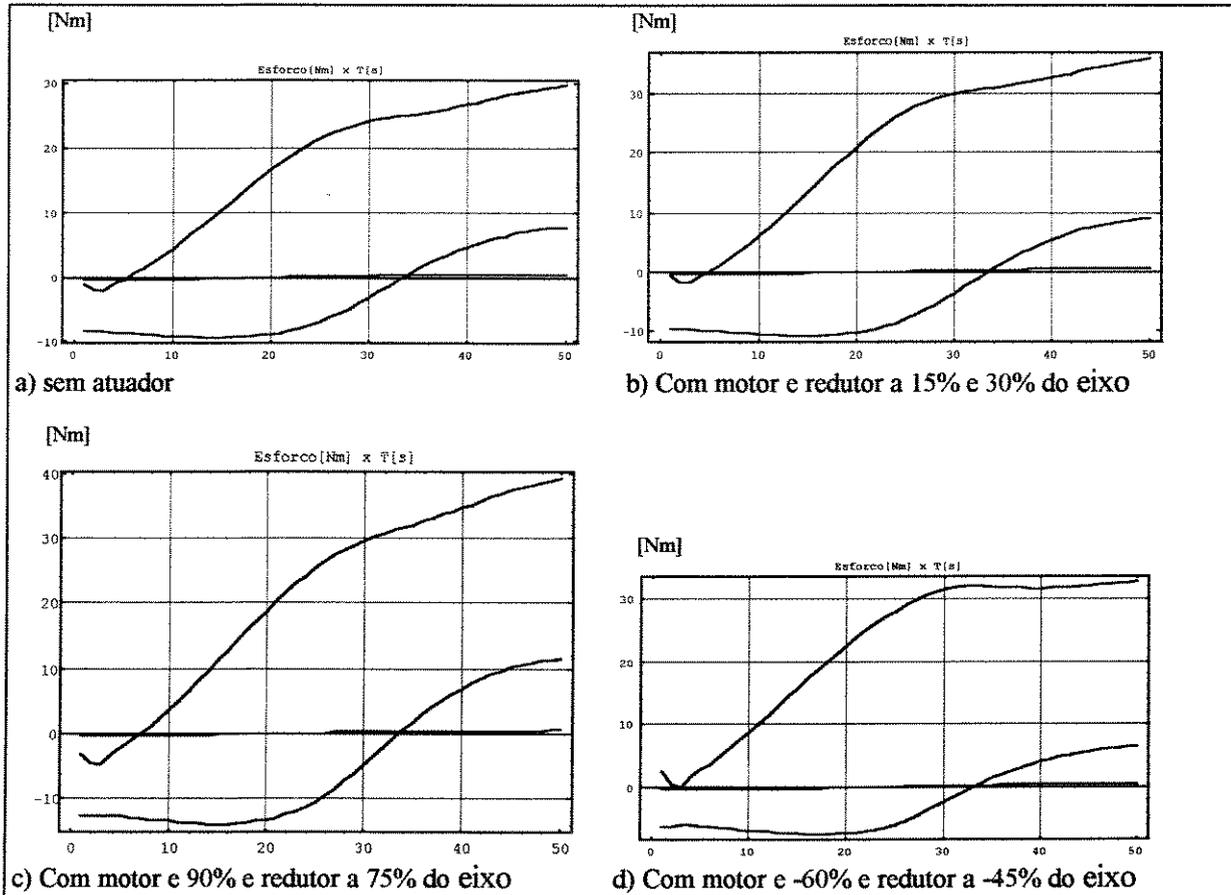


Figura 4.26: Esforços das três juntas em [Nm], para diversas posições dos motores distribuídos nos elos.

Baseados nos resultados apresentados, nas figuras 4.23, a 4.26, ficou constatado que o deslocamento dos atuadores na estrutura móvel do manipulador influi na resposta dinâmica do manipulador, e conseqüentemente na determinação do atuador correto para o manipulador, e que uma melhor distribuição dos atuadores e seus componentes na estrutura dos elos melhora esta resposta dinâmica. As respostas da junta três ou garra não foram influenciadas porque não existem atuadores fixados em sua estrutura. O atuador da junta 1, é fixado estruturalmente na base, pois, a aciona indiretamente, também não influi na resposta dinâmica pois a base não é móvel.

O esforço requerido pela junta 2, como pode-se verificar, na figuras 4.24, é menor quando o motor está situado na haste de compensação, ver figura 4.24a, do que quando não se considera a presença dos motores na estrutura do manipulador, ver figura 4.24d, isto é devido ao efeito de compensação parcial devido a inserção do motor como contrapeso, que reduz os esforços devido a ação gravitacional, ao contrário disto se pode verificar, os aumentos causados pela inserção dos atuadores do lado da haste de ação, que aumenta tanto quanto mais se afasta do eixo da junta na qual estão fixados, comparar figura 4.24a, 4.24b e 4.24c.

O mesmo não se pode dizer da junta 1, onde apesar de se usar a haste de compensação, não se teve uma diminuição de torque, com a inserção de atuadores na haste de compensação do elo 1, em relação a situação de quando não se computou os atuadores na estrutura dos elos do manipulador. A justificativa para isto, esta relacionada com o fato de que se está analisando um sistema de juntas móveis e não uma alavanca isolada, pois apesar de inserirmos atuadores na haste do elo 1, para compensar o peso de sua própria estrutura, não se pode ignorar que os atuadores do mesmo tamanho foram inseridos nas hastes do elo 2 e que estes se encontram muito mais longe que o primeiro, o que faz com que o momento gravitacional produzido por estes na junta 1 seja maior que aquele produzido pelos atuadores fixados na haste de compensação do elo 1.

4.3.2 Diferentes Distribuições de Atuadores Conforme a Configuração do Sistema de Acionamento

Na última simulação foi visto que o modelo desenvolvido, graças as adaptações promovidas pelo programa AFICSE, programa analisado e comentado na seção 2.9 do capítulo 2, e que é sensível a distribuição dos atuadores na estrutura do robô, é portanto útil para análise de sistemas modulares, uma vez que considera as dimensões e localizações dos elementos componentes de cada módulo. Com base nisto, serão feitas novas simulações onde será mostrada a influência da distribuição dos atuadores conforme o tipo de configuração adotada para o sistema de acionamento, isto é, conforme o tipo de acionamento de cada uma das juntas.

Para esta análise do comportamento dinâmico e observação dos esforços de cada uma das juntas dos manipuladores, conforme a configuração de acionamento, caracterizada por diferentes localizações dos atuadores, e pela concentração de atuadores em cada junta, serão usados os modelos da figura 4.27, onde os seis primeiros modelos, ilustrados pelas figuras 4.27a a 4.27f não usam distribuição dos atuadores na estrutura do manipulador com a finalidade compensar o desequilíbrio de massas em torno dos eixos, ao contrário dos três ilustrados pelas figuras 4.27g a 4.27i. Esta análise visa validar o programa AFICSE comparando os casos onde os atuadores foram incorporados através dele com os casos onde este procedimento foi desprezado, por esta razão foi considerado também o caso das estruturas livres ou sem atuadores, representadas pelas figuras 4.27j e 4.27k. A classificação usada, na figura é definida nos seção 2.3 do capítulos 2 e seção A.2.3.2 do anexo A.

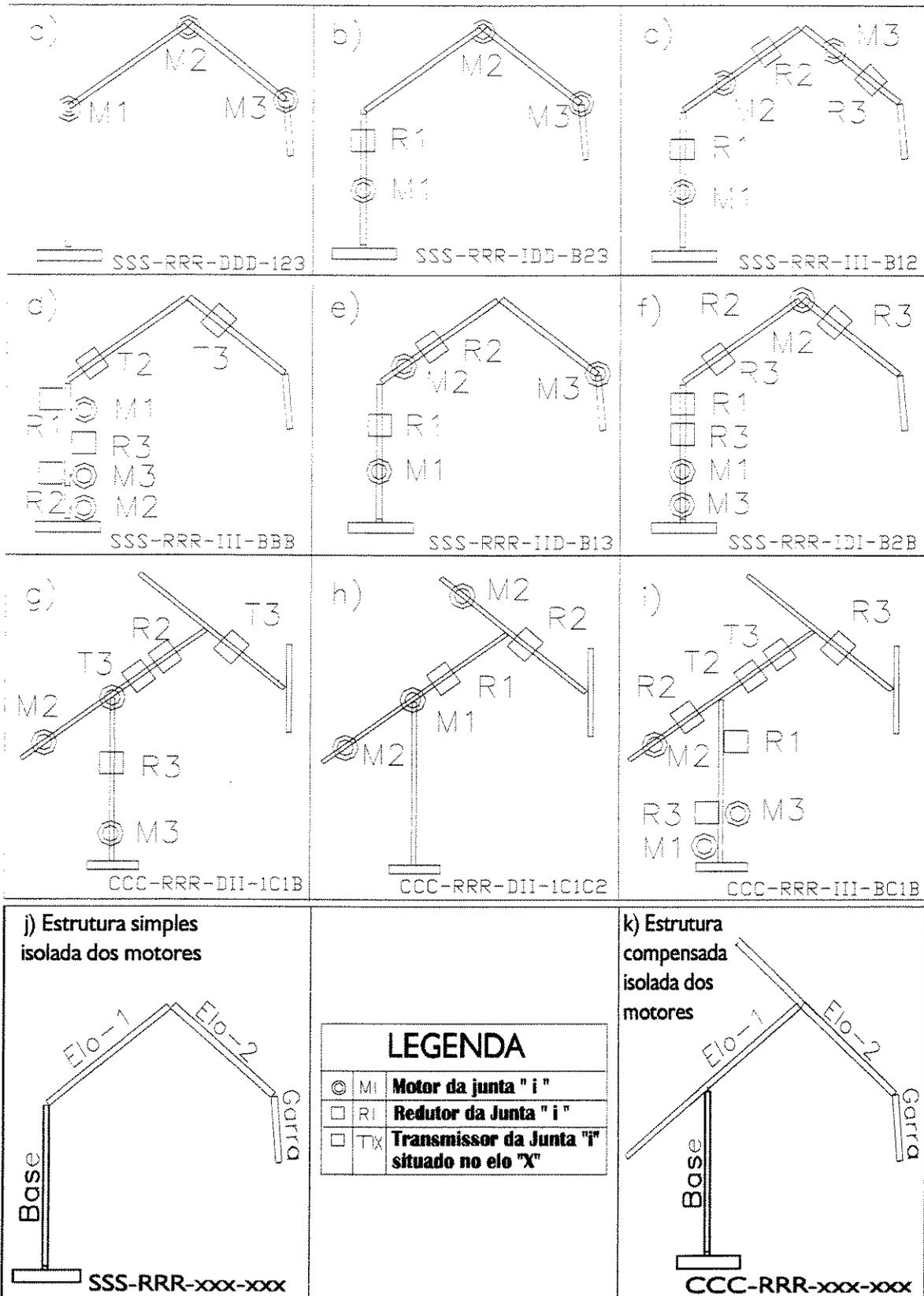


Figura 4.27) Diferentes tipos de configurações de acionamento, simulados, para análise dinâmica

As condições de operação, carga, e configurações dos diversos manipuladores indicados na figura 4.27, se encontram definidas na tabela 4.8, e o banco de dados com as definições matemáticas das colocações e orientações dos atuadores e seus componentes, conforme as diversas configurações de atuadores, definidas, é mostrado na Listagem B.4.

O tipo de acionamento mais usual para todos os tipos de manipuladores comerciais e modernos, são configurados mais ou menos como mostrado pela figura 4.27a que é um manipulador com acionamento direto em todas as juntas, e 4.27c, que é um manipulador com acionamento do tipo indireto onde as massas dos atuadores ficam localizados ou próximos das juntas acionadas. Muito provavelmente, todos os projetistas devem se preocupar em compensar os desequilíbrios de massas em torno dos eixos das juntas, e isto deve ser feito muito provavelmente, redistribuindo-os adequadamente na estrutura do manipulador. Esta simulação produziu as figuras 4.28 a 4.31, que serão comentadas posteriormente.

ORDEM	ITEM	DESCRIÇÃO DO ITEM
a	Número de pontos de amostragem	50 pontos
b	Tipo de garra	Simples
c	Tipo de robô	Cotovelo planar
d	Perfil de Tempo	Não importa
e	Centro de massa	Metade do elo - Eixo do elo
f	Algoritmo cinemático	Aproximação polinomial
g	Cinemática	Cotovelo acima
h	Estrutura	Simples tipo cotovelo
i	Modelo Dinâmico	Adaptativo gerado pelo programa (AMODIRO)
j	carga na garra	nula
k	trajeto	reta ligando (-0.3 , 0.9, 0.0) a (0.8 , 0.1, 0.0)
l	comprimento da elo 1	50 [cm]
m	comprimento da elo 2	50 [cm]
n	comprimento da garra	10 [cm]
o	tempo de percurso, ou tarefa	5[s]
p	Orientação da garra	variando de 135° até 10°
q	classe do robô (ver anexo A e capítulo 2)	1) SSS-RRR-DDD-123 2) SSS-RRR-IDD-B23 3) SSS-RRR-III-B12 4) SSS-RRR-III-BBB 5) SSS-RRR-IIDB13 6) SSS-RRR-IDI-B2B 7) CCC-RRR-DII-BC1B 8) CCC-RRR-DII-1C1C2 9) CCC-RRR-III-BBB
r	graus de liberdade	3 GL

Tabela 4.7: condições e características do manipulador para 9 diferentes configurações de acionamento.

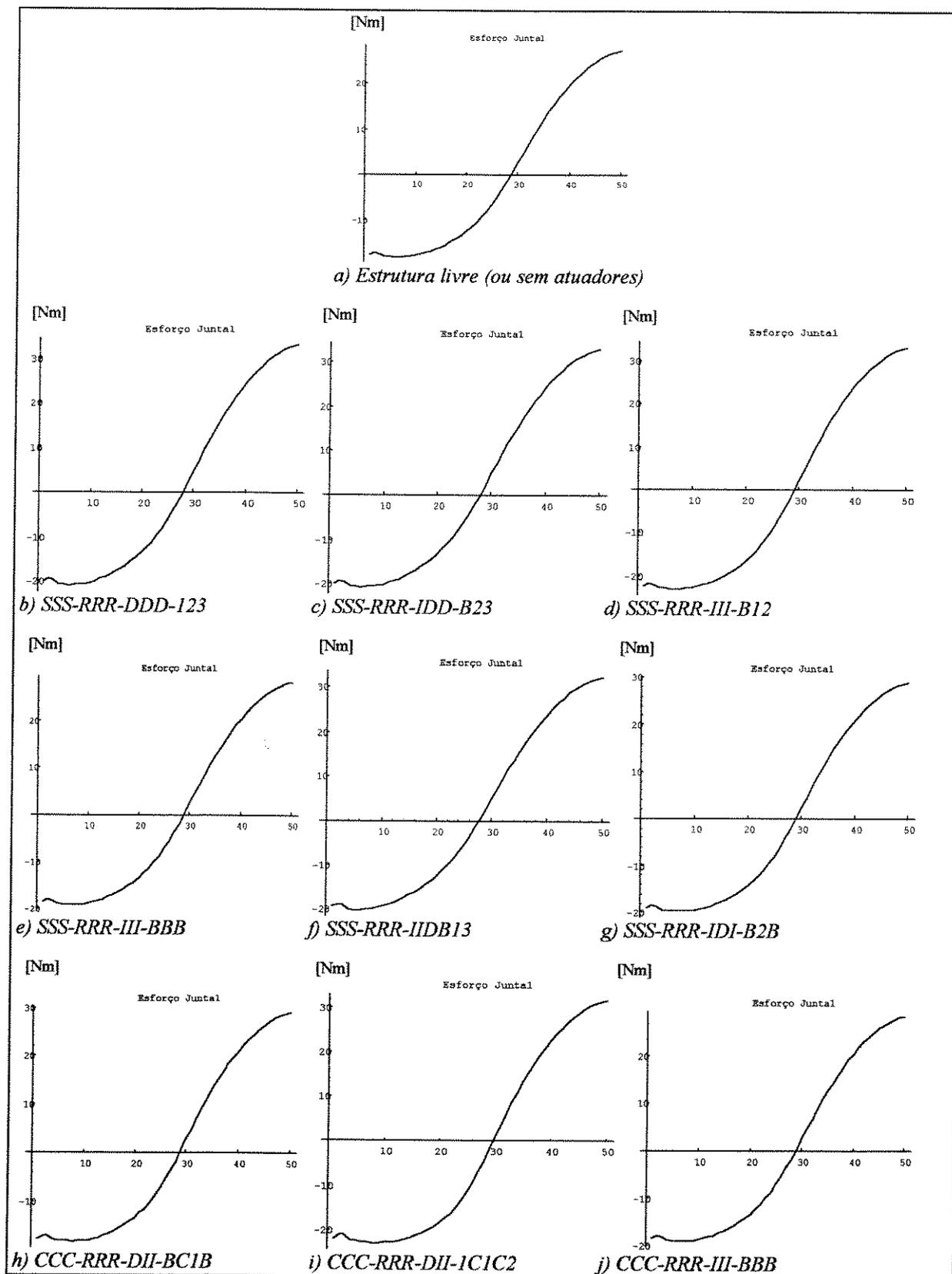


Figura 4.28: Esforços para a junta 1, para diferentes tipos de configurações de acionamento

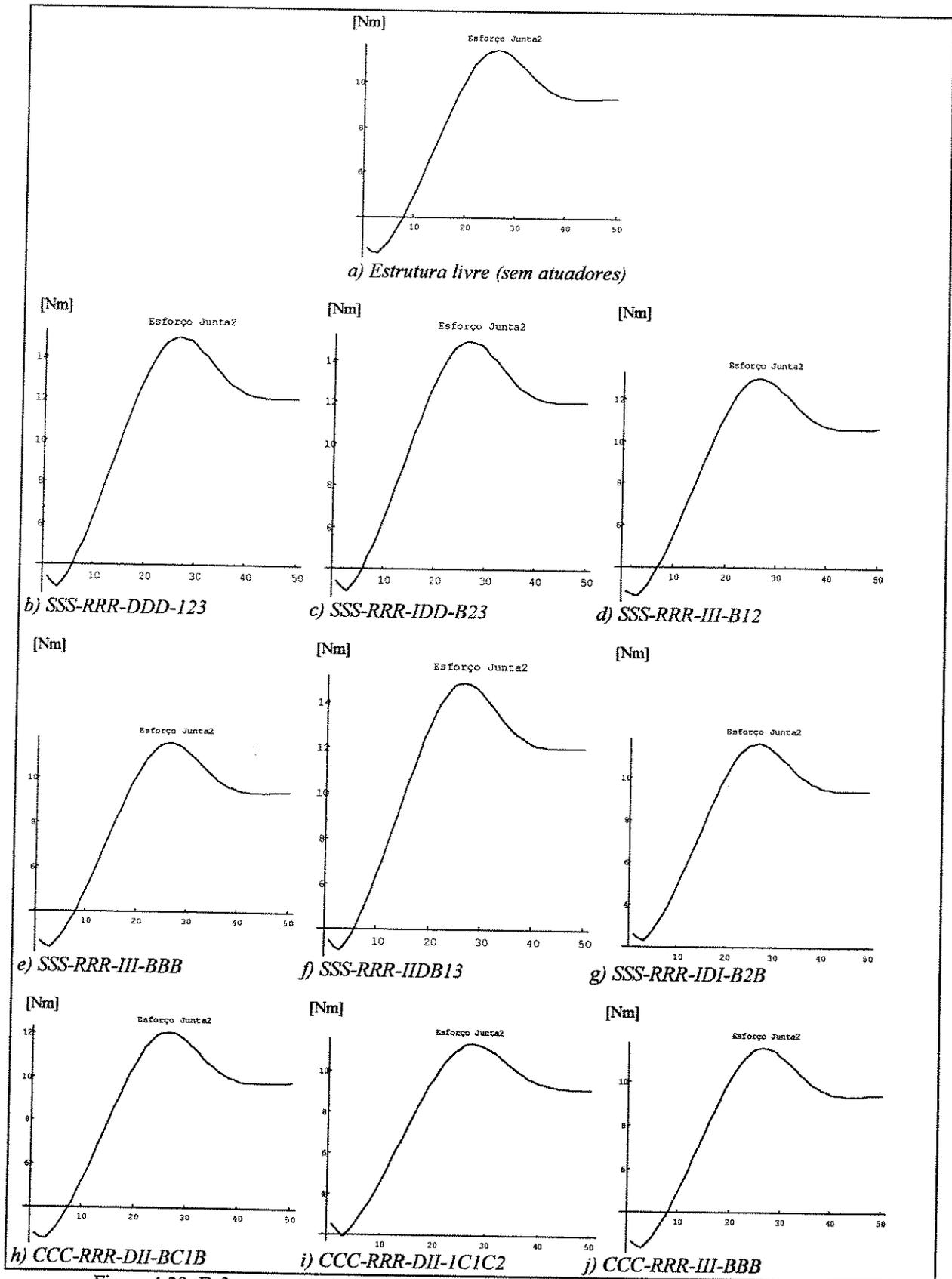


Figura 4.29: Esforços para a junta 1, para diferentes tipos de configurações de acionamento

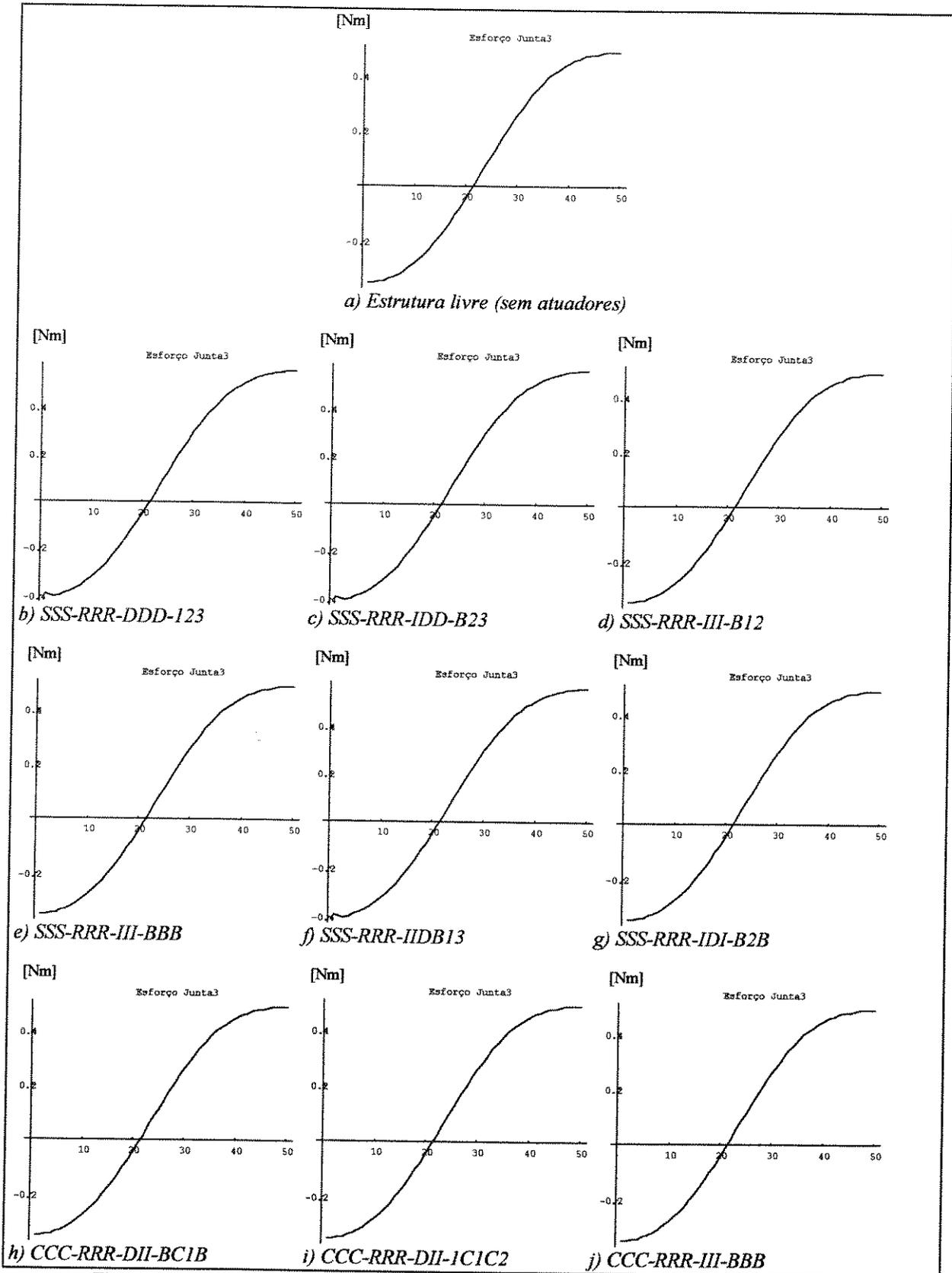


Figura 4.30: Esforços para a junta 3, para diferentes tipos de configurações de acionamento

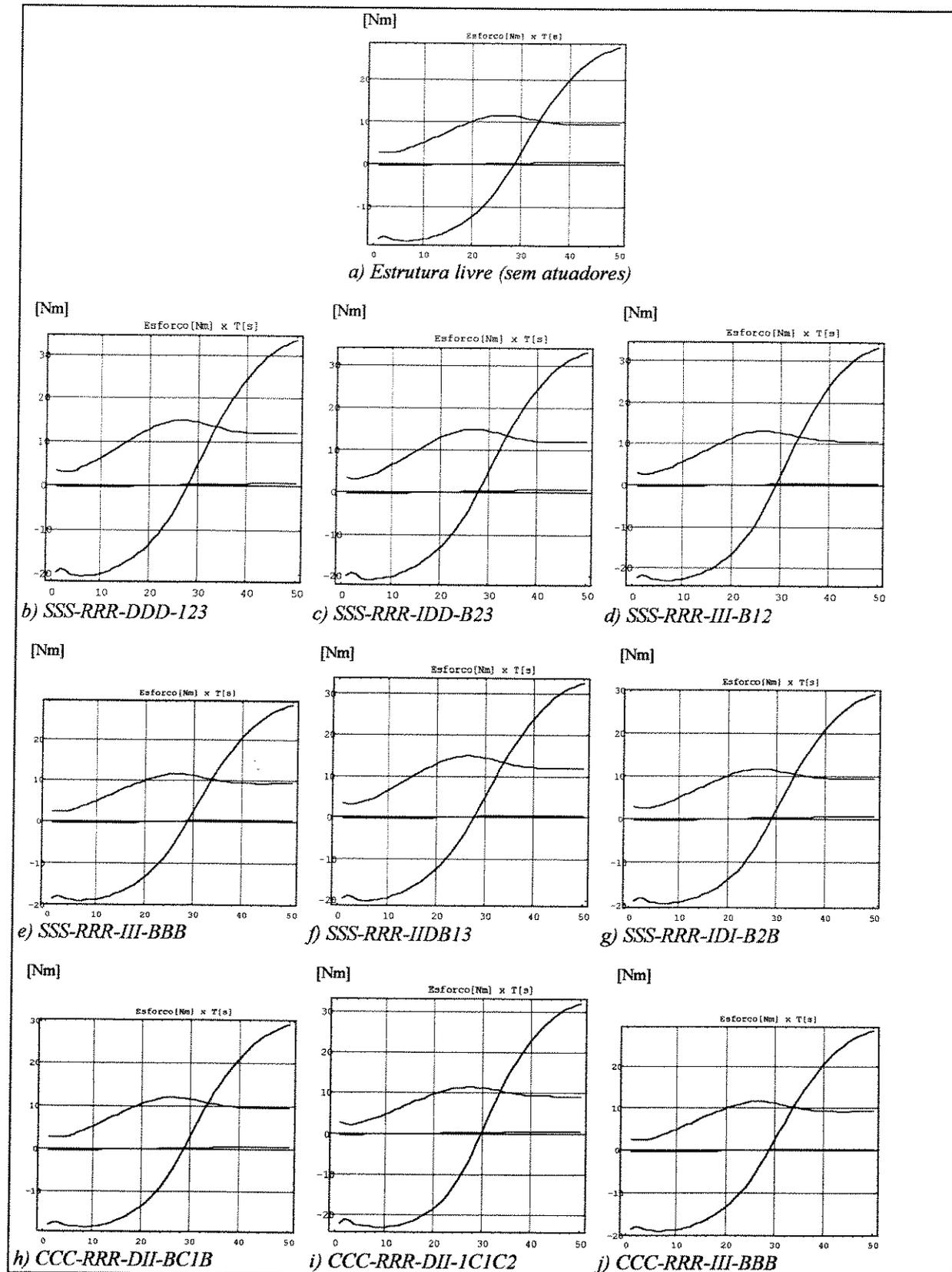


Figura 4.31: Esforços de todas as juntas, para cada tipos de configurações de acionamento.

Na simulação, as hastes de compensação foram consideradas de peso desprezível, e sua função aqui se limitou a suportar os atuadores que foram distribuídos com esta função.

As figuras de 4.28 a 4.30, se referem aos esforços das juntas 1, 2 e 3, respectivamente. Baseado nos resultados obtidos, se pode verificar que os esforços da junta três, aparentemente, não são alteradas pela modificação da configuração, mas isto não é realidade, o problema é que quando a junta três é acionada indiretamente, seus atuadores e acessórios, não a compõe estruturalmente, e se o acionamento for direto, o rotor, que a compõe, é integrado dinamicamente na hora da seleção do motor, já o estator, se encontra solidamente integrando ao elo anterior da junta acionada, e como o elo três é o último, para as condições estabelecidas, ele não pode integrar este resultado modificando o esforço da junta.

Como se pode verificar, cada configuração de acionamento, causa uma determinada e diferente modificação do comportamento dinâmico de cada junta, o que deve influir também no processo de escolha de atuadores, por ser este proporcional aos valores dos torque de pico e eficazes das juntas, como demonstrado no capítulo 3. Analisando-se as figuras 4.28 e 4.29, verifica-se que a influência dos atuadores nos esforços requerido pela junta 2, são mais significativos, do que para os esforços da junta 1, ou seja, a junta 2 é mais sensível as modificações estruturais cassadas pelos diferentes configurações.

A explicação disto está no fato de que a massa da junta 2, é muito menor que na junta 2, além do fato de que a junta 1 aciona as massas de todos os elos de ordem superior, assim, a relação de massa dos dispositivos que compõem os atuadores e integram a junta relativa a massa acionada por esta junta, é muito maior na junta 2, do que na junta 1, isto faz com que a integração dos atuadores naquela estrutura se torne muito mais significativa, e como o esforço produzido na junta é proporcional a massa, a modificação da intensidade de esforços também se torna mais marcante na junta 2 do que na junta 1.

4.3.3 Algoritmos Cinemáticos para Geração da Trajetória da Garra.

Este estudo está direcionado a verificar a sensibilidade do modelo dinâmico aos perfis de velocidade posição e aceleração da garra para seguir uma determinada trajetória no espaço. Neste item será examinado a influência de alguns diferentes algoritmos de estabelecimento do perfil cinemático no torque das juntas, o que pode modificar o valor eficaz dos mesmos influenciando no processo de seleção de atuadores. Serão verificados três tipos de algoritmos diferentes para determinar a trajetória cartesiana da garra do robô. Os dois primeiros estabelecem os perfis de velocidade e aceleração por trechos de curvas, e por aproximação polinomial, e são tradicionalmente usados para fazer controle ponto a ponto, através dos quais a garra vai de um ponto definido a outro seguindo uma reta, [CRAIG 89].

O outro algoritmo (por curvas paramétricas), define uma trajetória genérica no espaço em função do tempo gasto para a realização da tarefa pela ponta garra, através do emprego de funções paramétricas, onde a amostragem pode ou não ser homogênea, como será visto na próxima investigação, pois a variação de tempo não precisa ser constante, (neste caso foi usado um perfil de tempo parabólico para a garra).

As condições para simulação desta análise são apresentadas na tabela 4.9, e o banco de dados gerado pelo programa AAMMOVISA e utilizado pelo programa AMODIRO para determinar os perfis de esforços das juntas para estas condições foi registrado na listagem B.5 do anexo B.

ORDEM	ITEM	DESCRIÇÃO DO ITEM
a	Número de pontos de amostragem	50 pontos
b	Tipo de garra	Simplex
c	Tipo de robô	Cotovelo planar
d	Perfil de Tempo	Não importa, ou parabólica
e	Centro de massa	Metade do elo
f	Algoritmo cinemático	1) Aproximação polinomial 2) Por trechos de retas, rampas e parábolas 3) Curvas paramétricas, (variação tempo parabólica)
g	Cinemática	Cotovelo acima
h	Estrutura	Simplex tipo cotovelo
i	Modelo Dinâmico	Adaptativo gerado pelo programa (AMODIRO)
j	carga na garra	nula
k	trajeto	reta ligando (-0.3 , 0.9, 0.0) a (0.8 , 0.1, 0.0)
l	comprimento da elo 1	50 [cm]
m	comprimento da elo 2	50 [cm]
n	comprimento da garra	10 [cm]
o	tempo de percurso, ou tarefa	5[s]
p	Orientação da garra	variando de 135° até 10°
q	classe do robô	SSS-RRR-xxx-123
r	graus de liberdade	3 GL

Tabela 4.9: Banco usado pelo AMODIRO, para análise das sensibilidade da modelagem dinâmica aos diversos algoritmos de determinação do perfis cinemáticos.

A seguir são mostradas as curvas que descrevem o comportamento cinemático, posição angular, velocidade e acelerações, vide figuras 4.32 a 4.34 respectivamente, para os três tipos de algoritmos cinemáticos para a garra, *a* por trechos, *b* paramétrico e *c* polinomial, também o comportamento dinâmico esperado para cada junta, vide figuras 4.35, 4.36 e 4.37, mostrados os perfis de esforços, respectivamente para as juntas 1, 2 e 3 que é a garra, para a realização da tarefa especificada, ou seja uma reta ligando as coordenadas (-0.3 , 0.9, 0.0) a (0.8 , 0.1, 0.0). A figura 4.38, aglomera os esforços de todas as juntas.

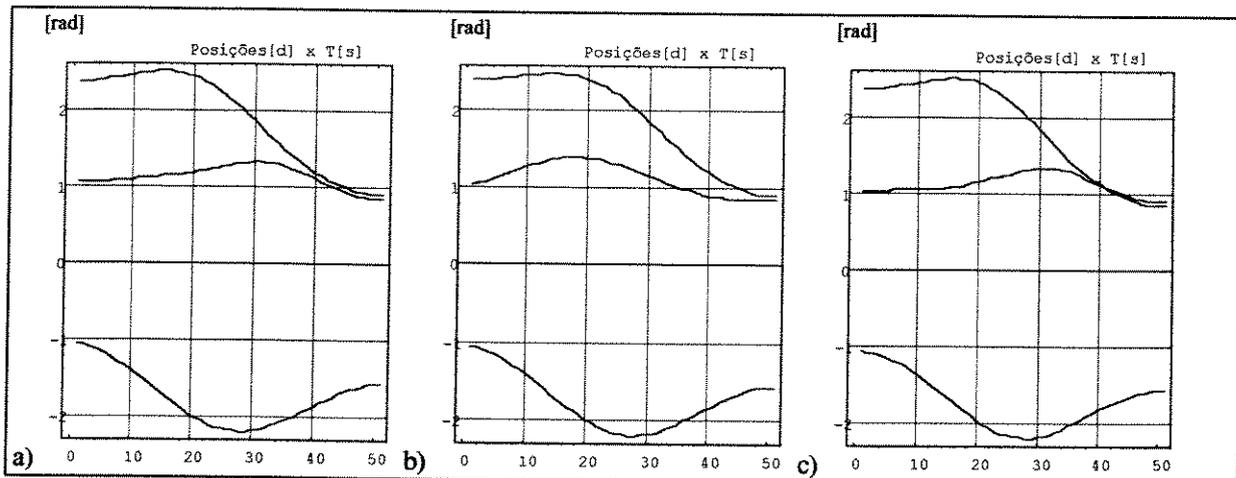


Figura 4.32: Ângulos de juntas, obtidos através de diferentes algoritmos cinemáticos para a garra, a) por aproximação polinomial, b) por curvas paramétricas e c) por trechos de curvas.

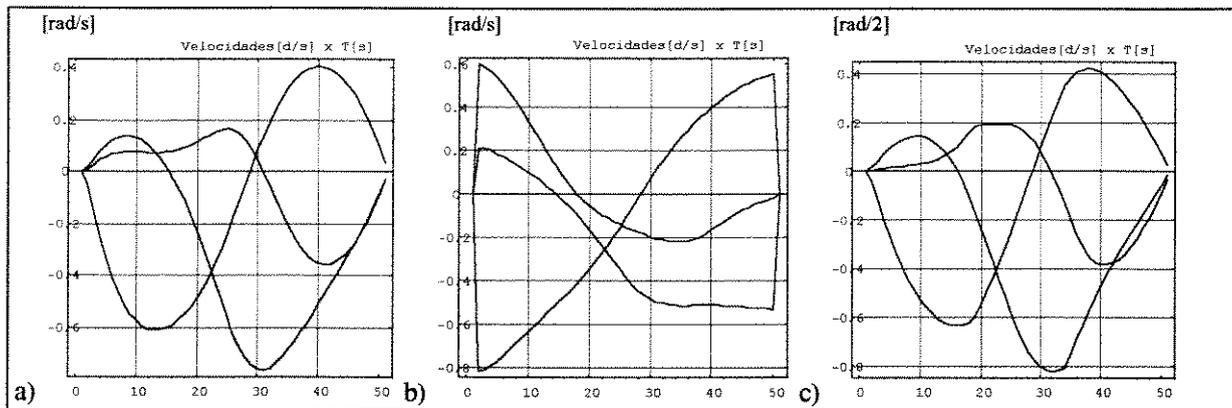


Figura 4.33: Velocidades de juntas, obtidas através de diferentes algoritmos cinemáticos para a garra, a) por aproximação polinomial, b) por curvas paramétricas e c) por trechos de curvas,

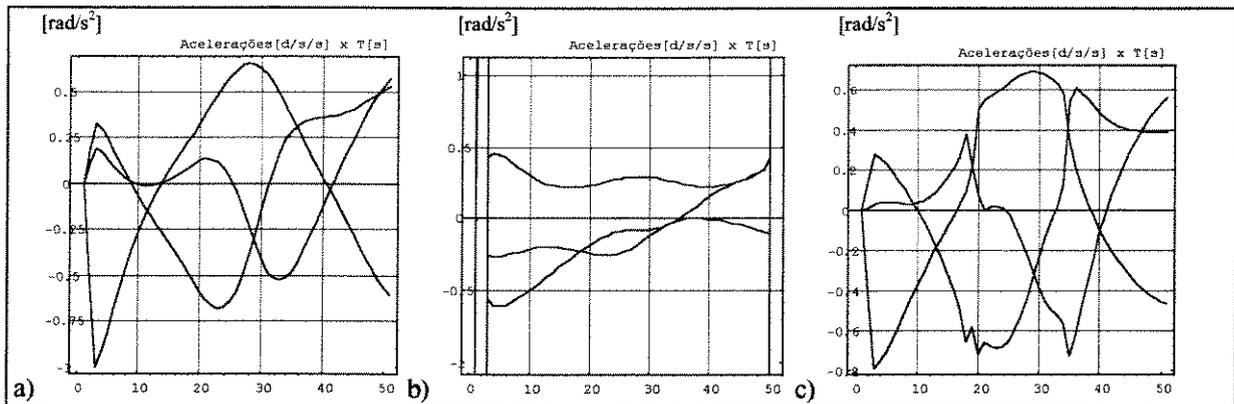


Figura 4.34: Acelerações de juntas, obtidas através de diferentes algoritmos cinemáticos para gerar a trajetória da garra por: a) aproximação polinomial, b) curvas paramétricas e c) trechos de curvas,

As condições empregadas para se chegar a estes resultados, são as mesmas usadas para se obter os resultados da figura 4.3, pode-se ver que aqueles gráficos são semelhantes aos gráficos 4.32a, 4.33a e 4.34a que utiliza a aproximação polinomial para gerar a trajetória da garra citada no capítulo 7 de [SPONG, 89], e que diverge um pouco da aproximação polinomial cujas respostas são mostradas gráficos 4.32c, 4.33c e 4.34c.

A utilização de curvas paramétricas foi desastrosa, quando utilizada com esta finalidade, porque na definição das variações de tempo de amostragem foram utilizados perfis tempos específicos, que começavam por zero, no tempo zero. Uma função computacional empregada conforme a seção A.2.6.5 do anexo A, divide o valor da função desejada para o perfil de tempo pelo tempo acumulado, como este tempo no início do trajeto é nulo, ocorre uma divisão por zero e o parâmetro assume proporções infinitas como mostra as curva de aceleração dos gráficos das figuras 4.34b. Isto justifica também as discrepâncias daqueles resultados das figuras gráficos da velocidade da figura 4.33b.

No final do processo, a simulação mostra que este algoritmo permitiu um posicionamento do manipulador semelhante ao obtido com os demais algoritmos, veja a figura 4.32b. Como a modelagem dinâmica depende das forças gravitacionais que são influenciadas pelos ângulos das juntas que influenciam fortemente na configuração, os esforços foram aproximadamente os mesmos, muito embora tenham sido significativamente influenciados pela aceleração das juntas no início do percurso, como se poderá ver nas figuras, 4.35b, 4.36b, 4.37c e 4.38c.

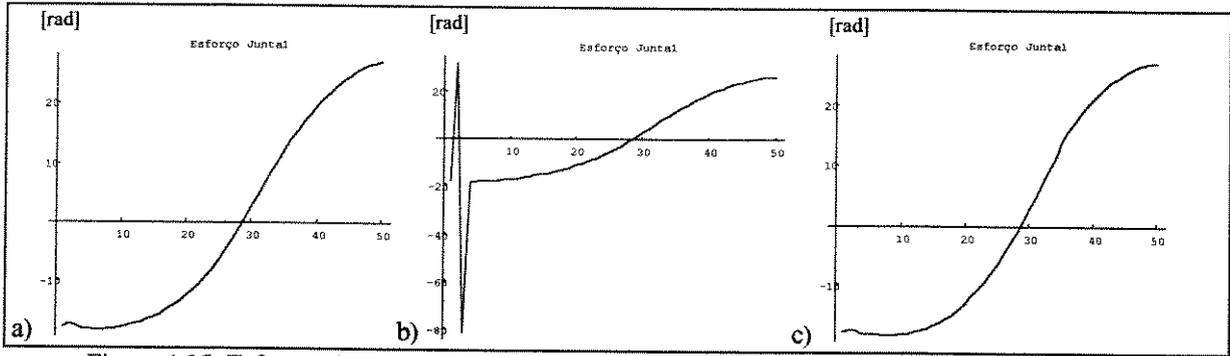


Figura 4.35: Esforços da junta 1, obtidos através de diferentes algoritmos cinemáticos para a garra, a) por aproximação polinomial, b) por curvas paramétricas e c) por trechos de curvas.

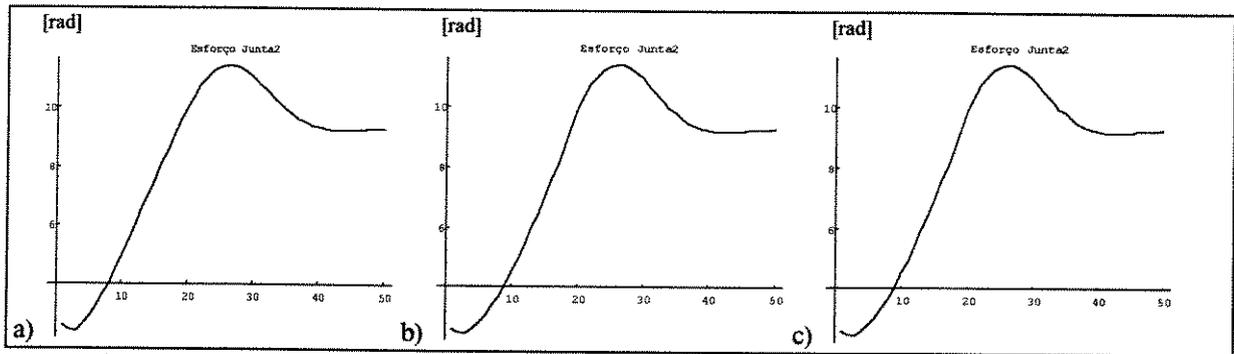


Figura 4.36: Esforços da junta 2, obtidos através de diferentes algoritmos cinemáticos para a garra, a) por aproximação polinomial, b) por curvas paramétricas e c) por trechos de curvas.

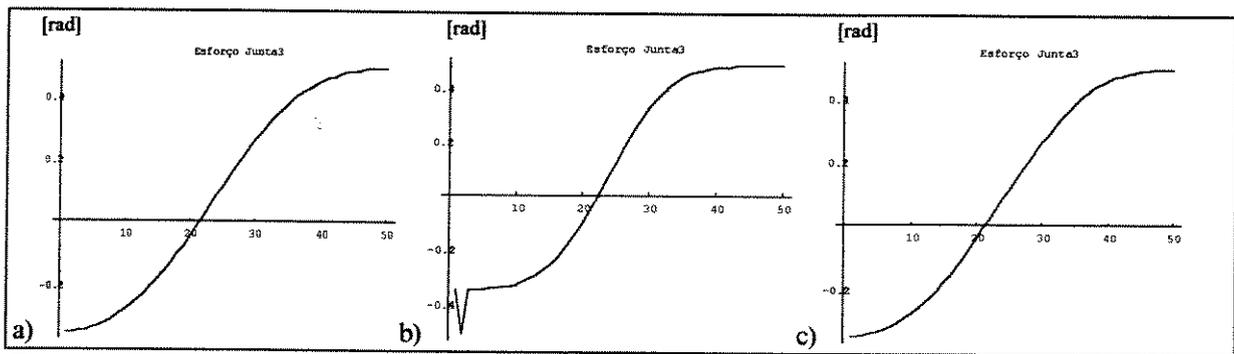


Figura 4.37) Esforços da junta 3, obtidos através de diferentes algoritmos cinemáticos para a garra, a) por aproximação polinomial, b) por curvas paramétricas e c) por trechos de curvas.

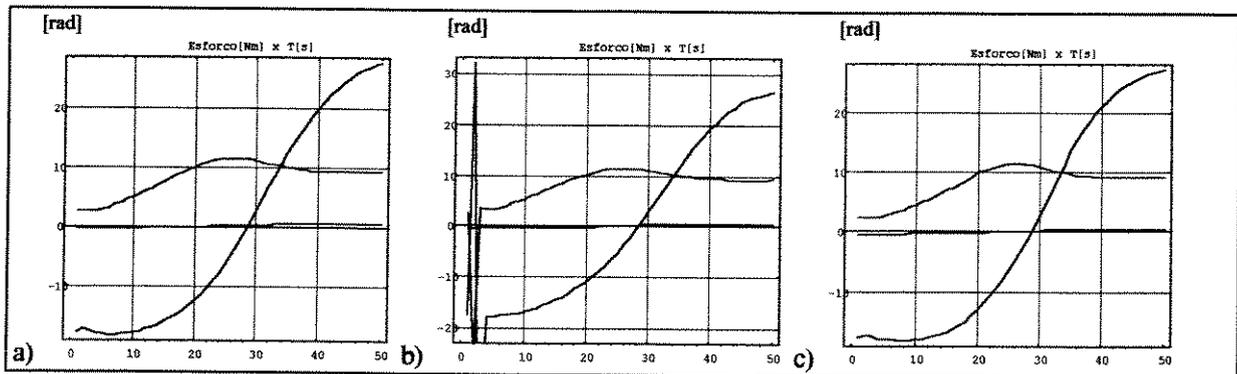


Figura 4.38: Esforços da junta 1, obtidos através de diferentes algoritmos cinemáticos para a garra, a) por aproximação polinomial, b) por curvas paramétricas e c) por trechos de curvas.

Analisando as respostas dinâmicas para os diferentes algoritmos cinemáticos empregados para especificação da trajetória da garra, utilizando-se o algoritmo com curvas paramétricas, nota-se uma mudança brusca no torque no início e no final do trajeto, devido a descontinuidade no perfil da velocidade, que dá um salto brusco, o que é impraticável. Isto ocorre devido ao intervalo de tempo entre a primeira e segunda amostragem ser nulo, e como a velocidade é determinada pela variação do espaço percorrido pela variação de tempo, ocorre uma divisão por zero, o que pode ser suavizado pela imposição de um valor pequeno não nulo para este período de tempo.

4.3.4 Algoritmos Cinemáticos de Manipulador para Tarefas Variadas

No item anterior foi sugerido o emprego de curvas paramétricas para trajetórias variadas ou geração genérica de trajetórias, no caso foi empregado junto com outros três algoritmos diferentes para fazer a ponta da garra seguir uma reta. Aqui ele será empregado para gerar trajetórias diversas, e com o emprego do programa AMODIRO, desenhar-se-á os perfis dinâmicos das juntas do manipulador, mostrando sua sensibilidade ao traçado das trajetórias da garra, e depois para perfis de variação de tempo variados para traçar uma reta.

a) Diferentes Formas de Trajetórias da Garra não Retas

A análise dos perfis dinâmicos, para traçado de diferentes formas de trajetórias da garra não retilíneas, utiliza-se o modelo de manipulador cuja descrição de tarefa, condições, características e ambiente são representados na tabela 4.10. O banco de dados utilizado, pelo programa AMODIRO é apresentado na listagem B.5.

ORDEM	ITEM	DESCRIÇÃO DO ITEM
a	Número de pontos de amostragem	50 pontos
b	Tipo de garra	Simple
c	Tipo de robô	Cotovelo planar
d	Perfil de Tempo	Parabólico
e	Centro de massa	Metade do elo
f	Algoritmo cinemático da garra	Por curvas paramétricas
g	Cinemática	Cotovelo acima
h	Estrutura	Simple tipo cotovelo
i	Modelo Dinâmico	Adaptativo gerado pelo programa (AMODIRO)
j	carga na garra	nula
k	trajeto	1) espiral 2) circunferências múltiplas 3) elipses 4) cardioide
l	comprimento da elo 1	50 [cm]
m	comprimento da elo 2	50 [cm]
n	comprimento da garra	10 [cm]
o	tempo de percurso, ou tarefa	5[s]
p	Orientação da garra	variando de 135° até 10°
q	classe do robô	SSS-RRR-xxx-123
r	graus de liberdade	3 GL

Tabela 4.10: condições e características do manipulador para investigação de 3 algoritmos cinemáticos para determinação da trajetória da garra

As figuras 4.29 a 4.31, mostram os perfis de posição angular, velocidade e acelerações angulares respectivamente para as três juntas do manipulador empregado, e as figuras 4.32 a 4.34, mostram os perfis dinâmicos respectivamente das juntas 1, 2, 3 e a figura 4.35 mostra esforços de todas as juntas do manipulador simultaneamente no mesmo gráfico.

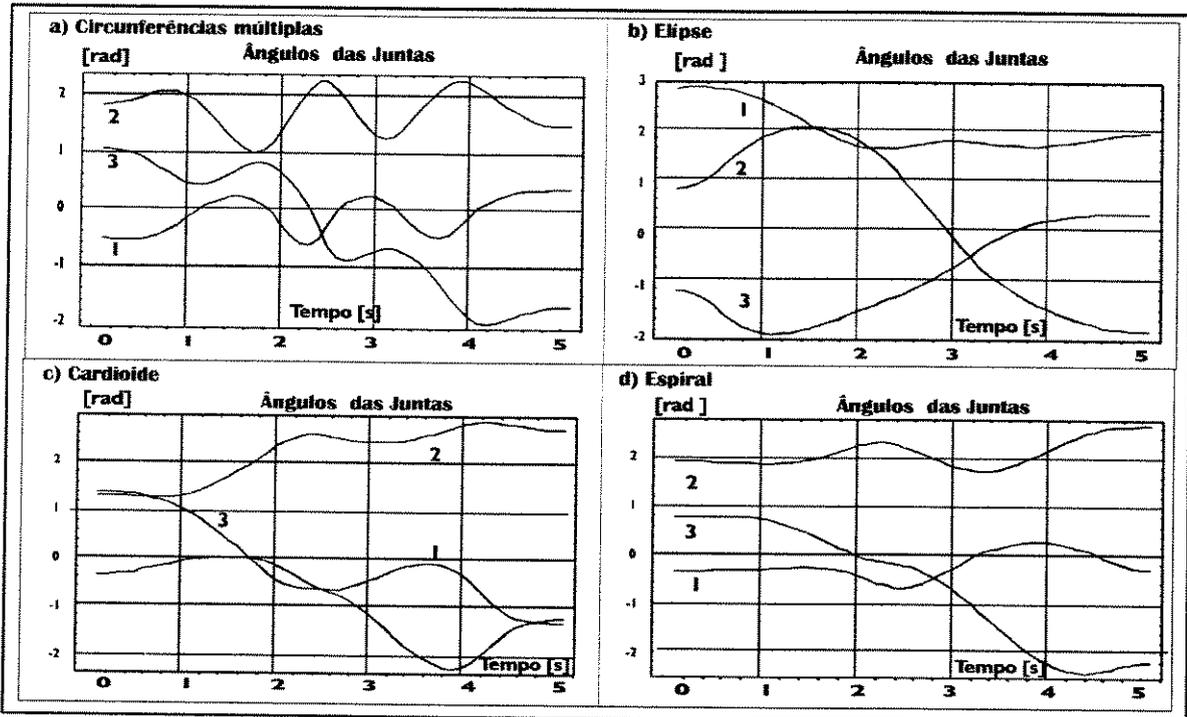


Figura 4.39: Posições angulares das 3 juntas para, 4 formas de trajetórias diferentes da garra do manipulador

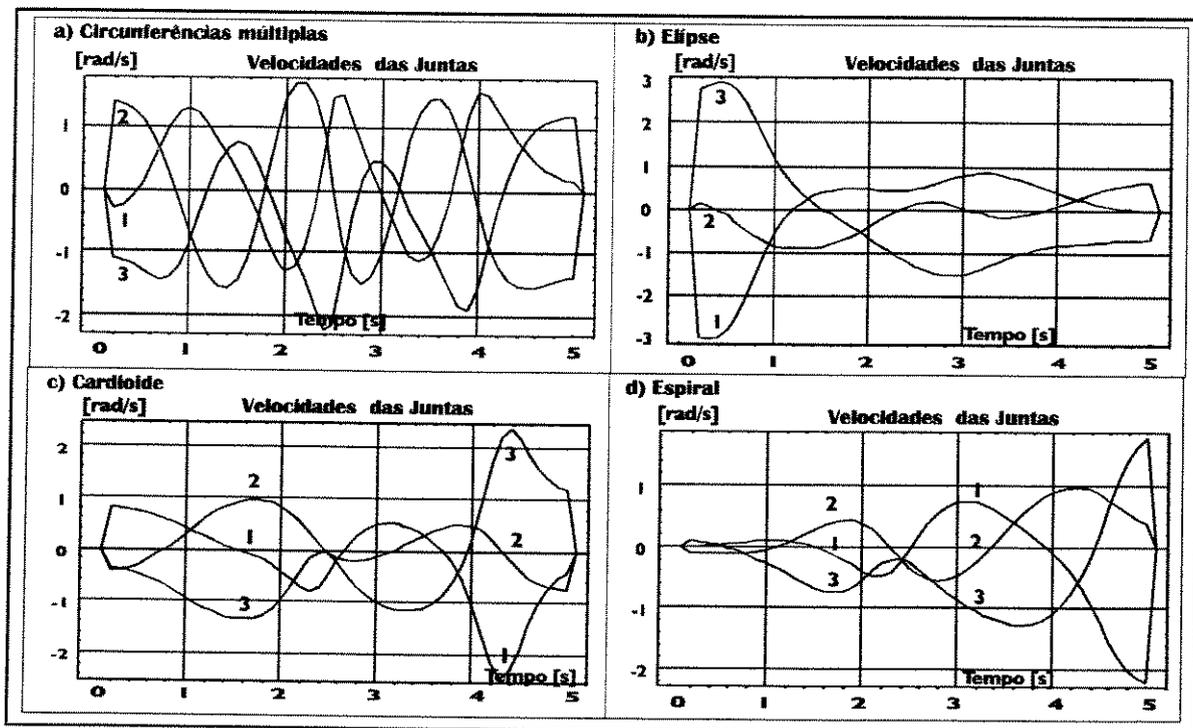


Figura 4.40: Velocidades das 3 juntas, para diferentes formas de trajetórias da garra do manipulador

Como se pode ver, é confirmado o que espera-se, que os valores de picos e valores eficazes dos torques sejam diferentes para cada trajetória seguida, seja ela uma espiral, múltiplas circunferências concêntricas, e de mesmo raio, seja uma elipse, ou também uma cardioide.

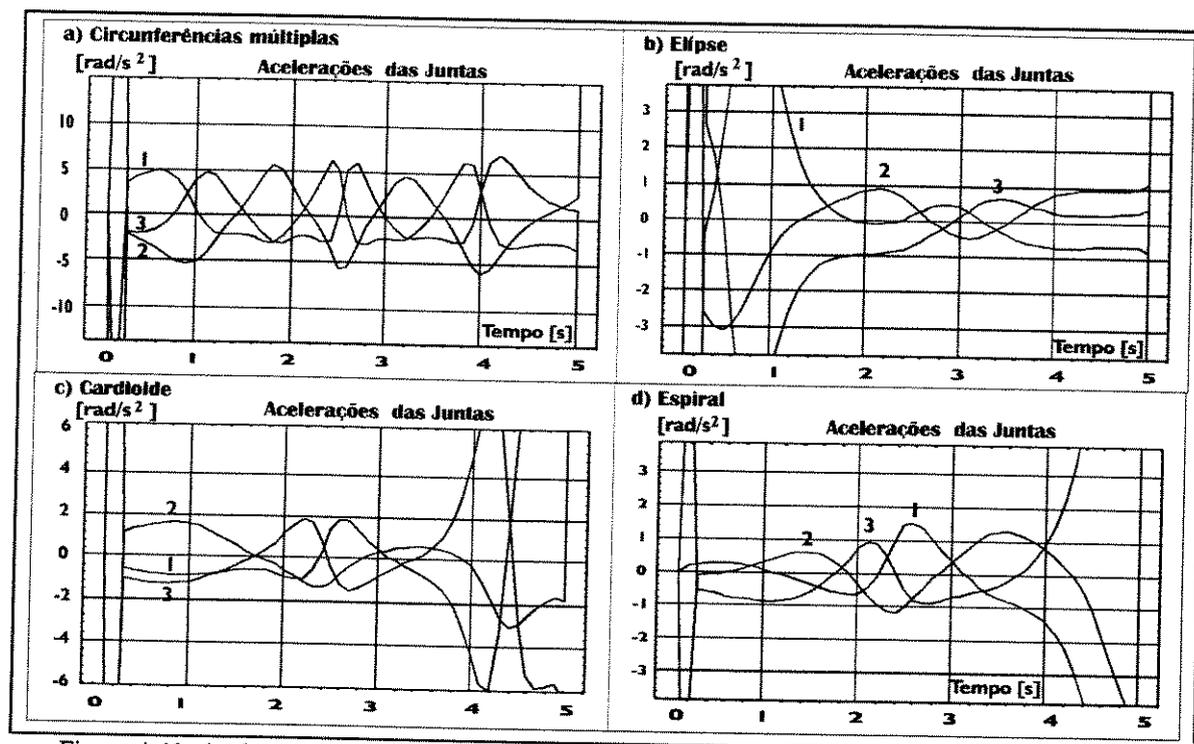


Figura 4.41: Acelerações das 3 juntas, para diferentes formas de trajetórias da garra do manipulador

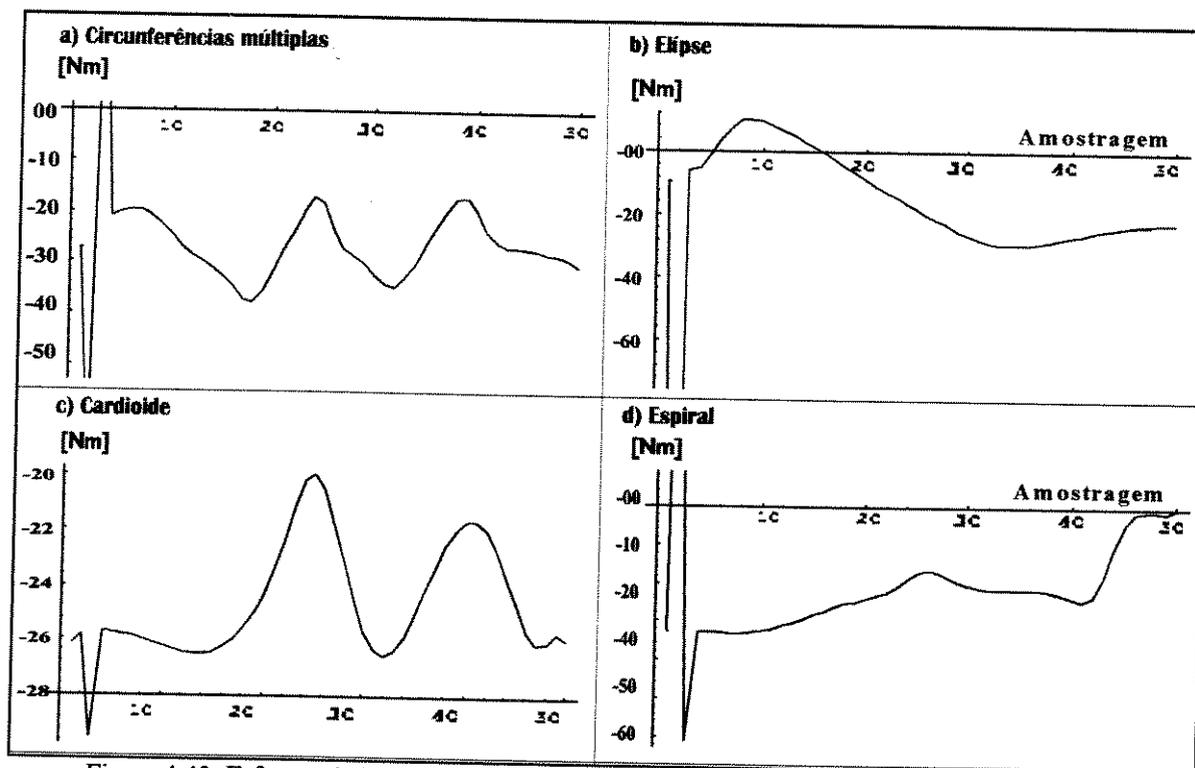


Figura 4.42: Esforços da junta 1, para diferentes formas de trajetórias da garra do manipulador

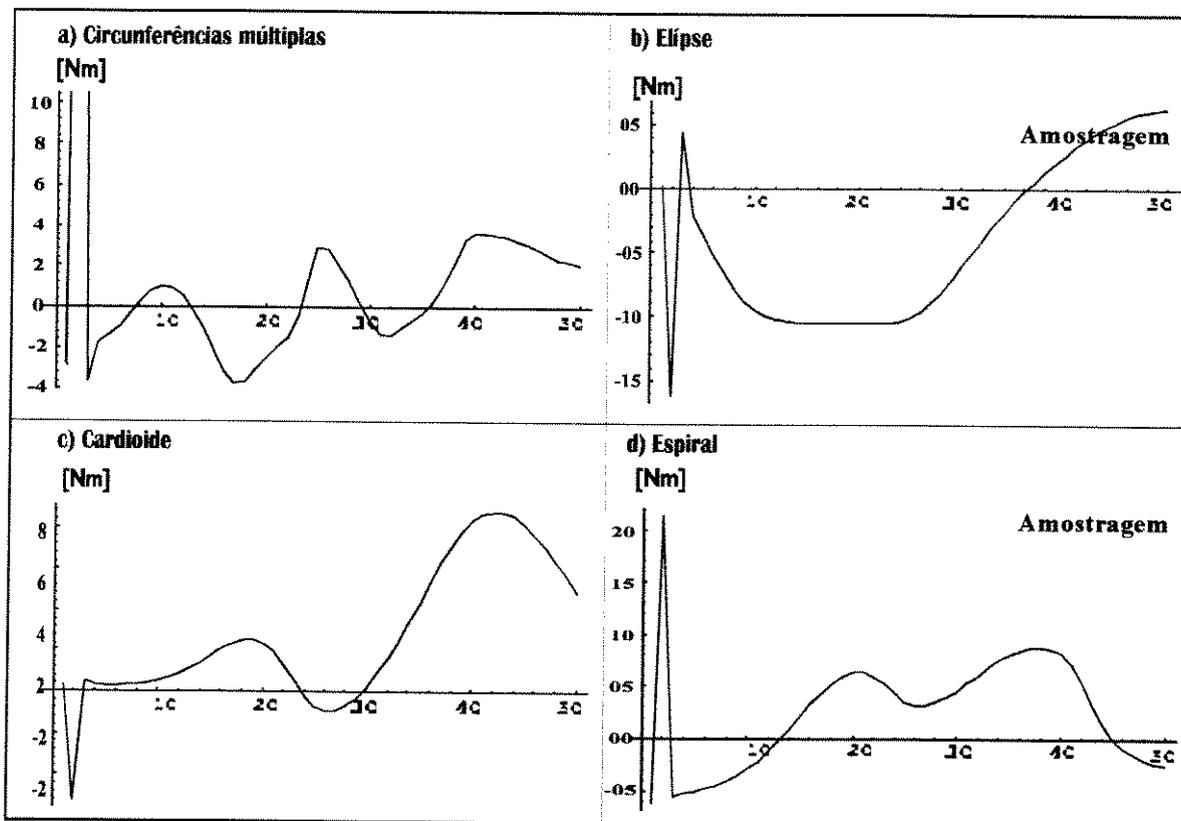


Figura 4.43: Esforços da junta 2, para diferentes formas de trajetórias da garra do manipulador

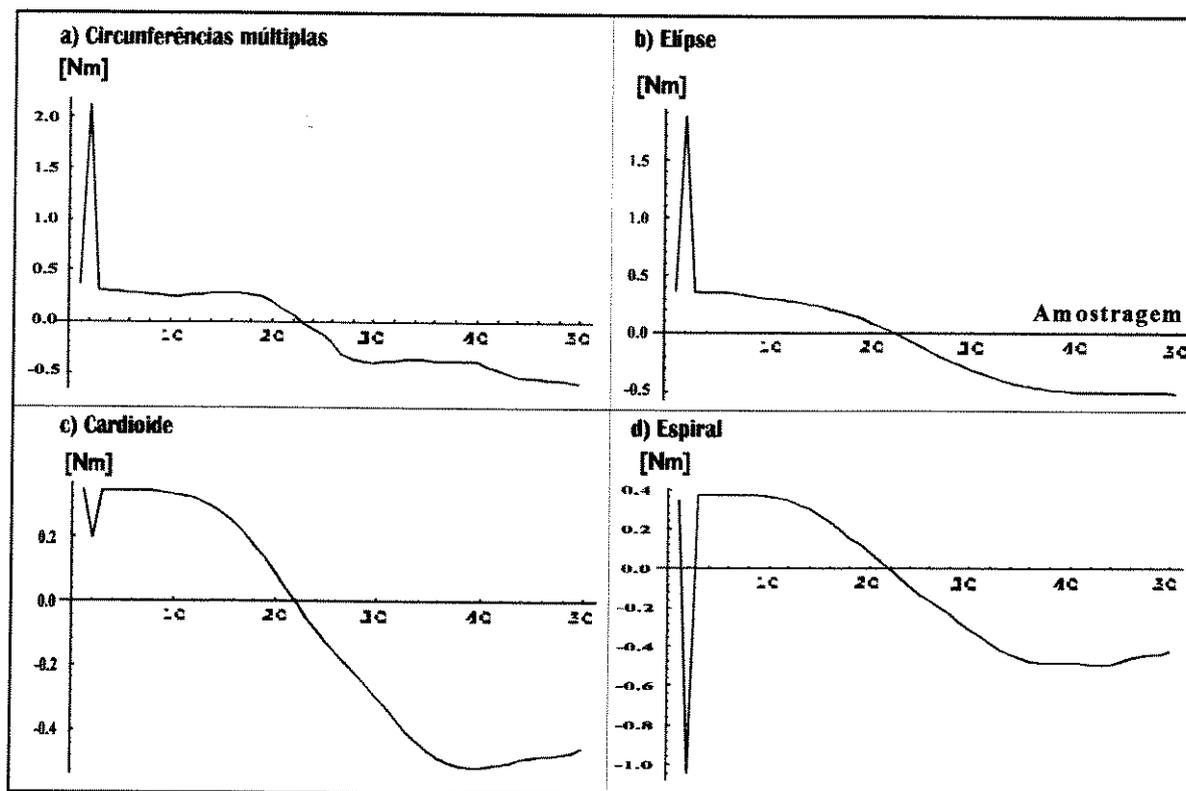


Figura 4.44: Esforços da junta 1, para diferentes formas de trajetórias da garra do manipulador

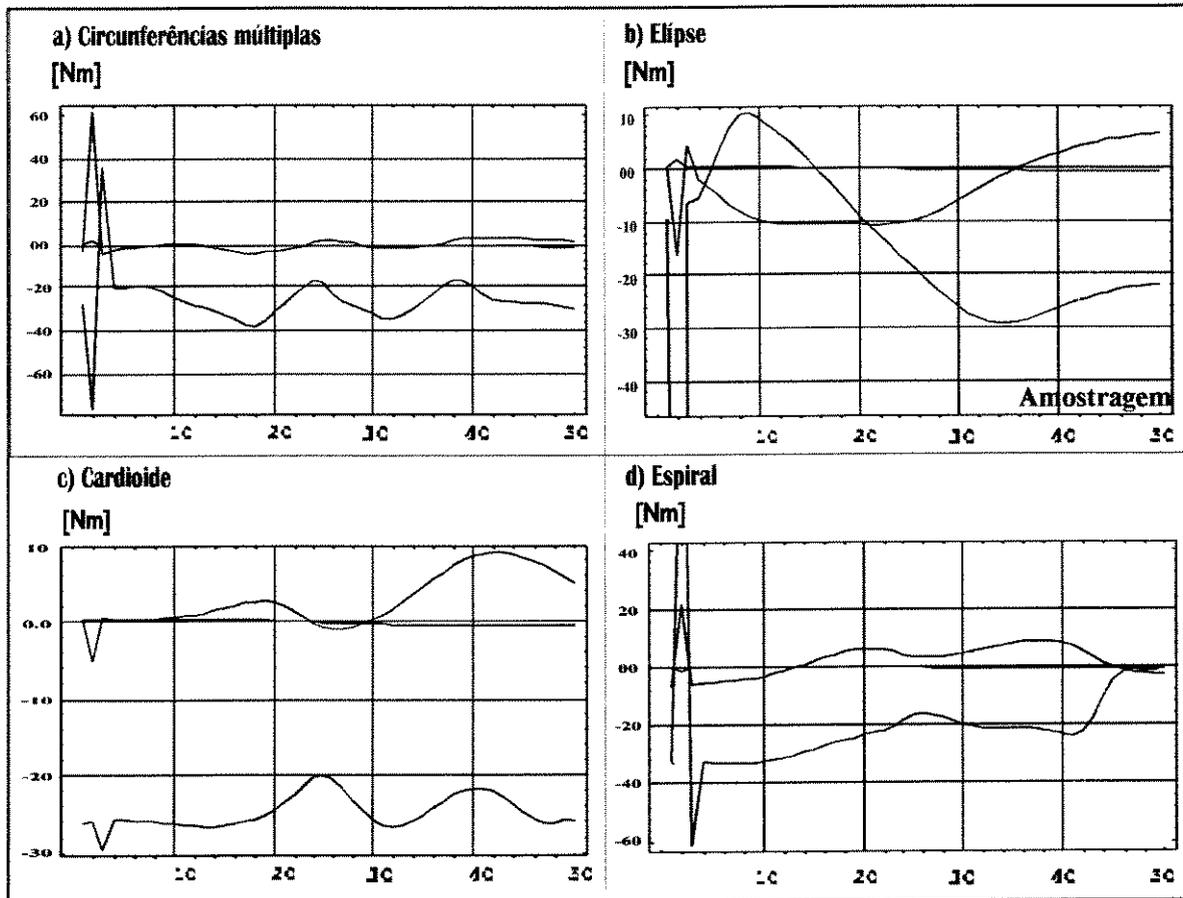


Figura 4.45: Esforços das 3 juntas, para diferentes formas de trajetórias da garra do manipulador

b) Diferentes Perfis de Variação de Tempo.

O objetivo desta análise é verificar o efeito dos diversos perfis de variação do tempo no modelo dinâmico quando se trabalha com curvas paramétricas que permitem a determinação de trajetórias curvas diversas. A análise da resposta dinâmica, para diferentes perfis de variação de tempo, usa o manipulador cuja descrição de tarefa, condições, características e ambiente são representados na tabela 4.11. O banco de dados usado para tal, pelo programa AMODIRO, é o mesmo da listagem B.5.

Os gráficos das figuras 4.46 a 4.52 representam as respostas obtidas neste estudo. O comportamento cinemático, é descrito pelas figuras 4.46 que mostra os perfis de variáveis de juntas (posição angular), 4.47 mostrando as velocidades das juntas, e 4.48, que apresentam as acelerações de juntas. A dinâmica é representada pelas figuras 4.49, 4.50 e 4.51 que mostram respectivamente os esforços das juntas 1, 2 e 3 que representa a garra, e finalmente a figura 4.52, que concentra numa só figura, todos os perfis de esforços para que se tenha uma noção da intensidade dos esforços entre todas as juntas. Para mostrar estes resultados dinâmicos, o programa AMODIRO, deve recorrer ao programa AHOVATA - Algoritmo para Homogeneização de Variação de Tempo de Amostragem, que filtra os sinais cinemáticos, que são amostrados com variação de tempo não homogênea, isto para produzir uma resposta visual correta na tela, porque matemática mostra apenas abcissas inteiras, na tela, e por isto foi usado como abcissas o número de amostragem de tempo e não o tempo, como o tempo entre uma amostragem e outra muda, deve-se padronizar ou homogeneizar estas amostras, o que é feito pelo programa AHOVATA, mostrado na seção A.3.4 do anexo A..

ORDEM	ITEM	DESCRIÇÃO DO ITEM
a	Número de pontos de amostragem	50 pontos
b	Tipo de garra	Simplex
c	Tipo de robô	Cotovelo planar
d	Perfil de variação de tempo	1 = constante 2 = triangular 3 = trapezoidal 4 = parabólico
e	Centro de massa	Metade do elo
f	Algoritmo cinemático da garra	(Por curvas paramétricas)
g	Cinemática	Cotovelo acima
h	Estrutura	Simplex tipo cotovelo
i	Modelo Dinâmico	Adaptativo gerado pelo programa (AMODIRO)
j	Carga na garra	Nula
k	Trajeto	Reta ligando (-0.3 , 0.9, 0.0) a (0.8 , 0.1, 0.0)
l	Comprimento da elo 1	50 [cm]
m	Comprimento da elo 2	50 [cm]
n	Comprimento da garra	10 [cm]
o	Tempo de percurso, ou tarefa	5[s]
p	Orientação da garra	Variando de 135° até 10°
q	Classe do robô	SSS-RRR-xxx-123
r	Graus de liberdade	3 GL

Tabela 4.10: Condições e características do manipulador para investigação de modificações dos esforços de um manipulador seguindo uma reta, usando curvas paramétricas, para quatro perfis de tempos diferentes.

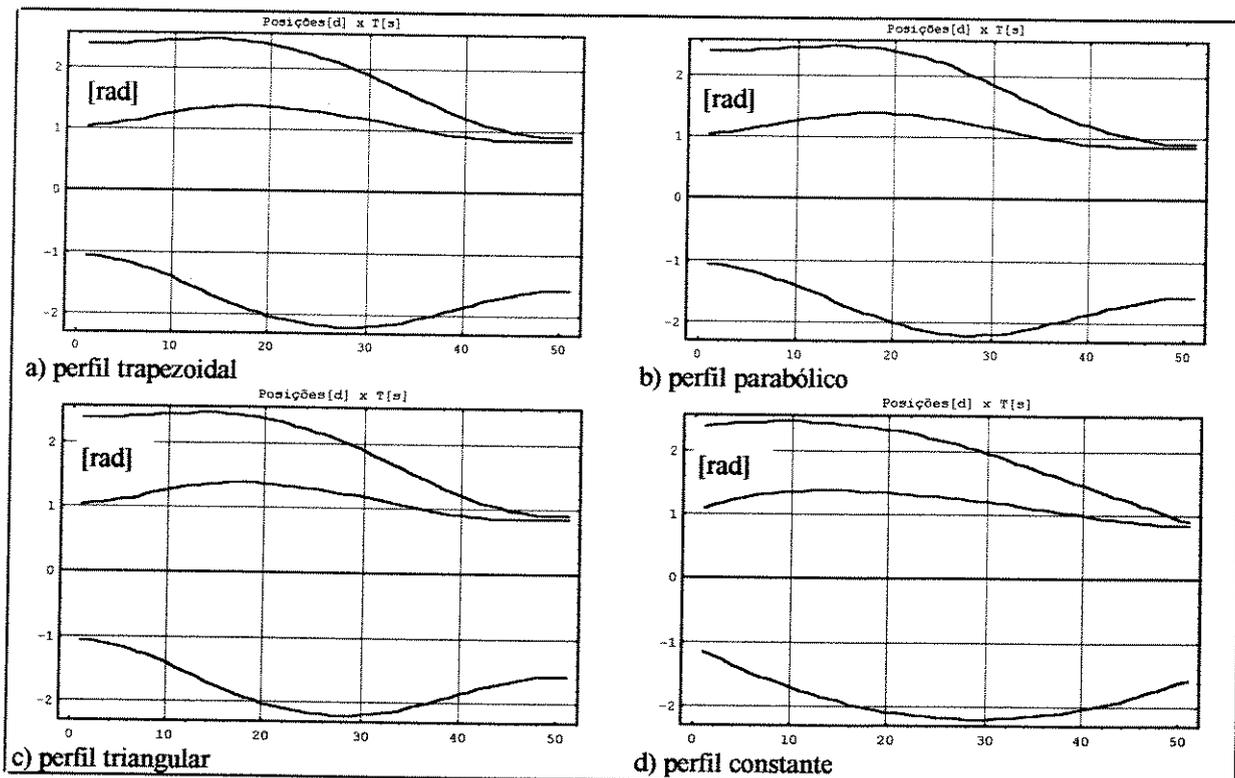


Figura 4.46: Posições angulares das três juntas do robô em [rad], com quatro diferentes perfis de tempo para garra.

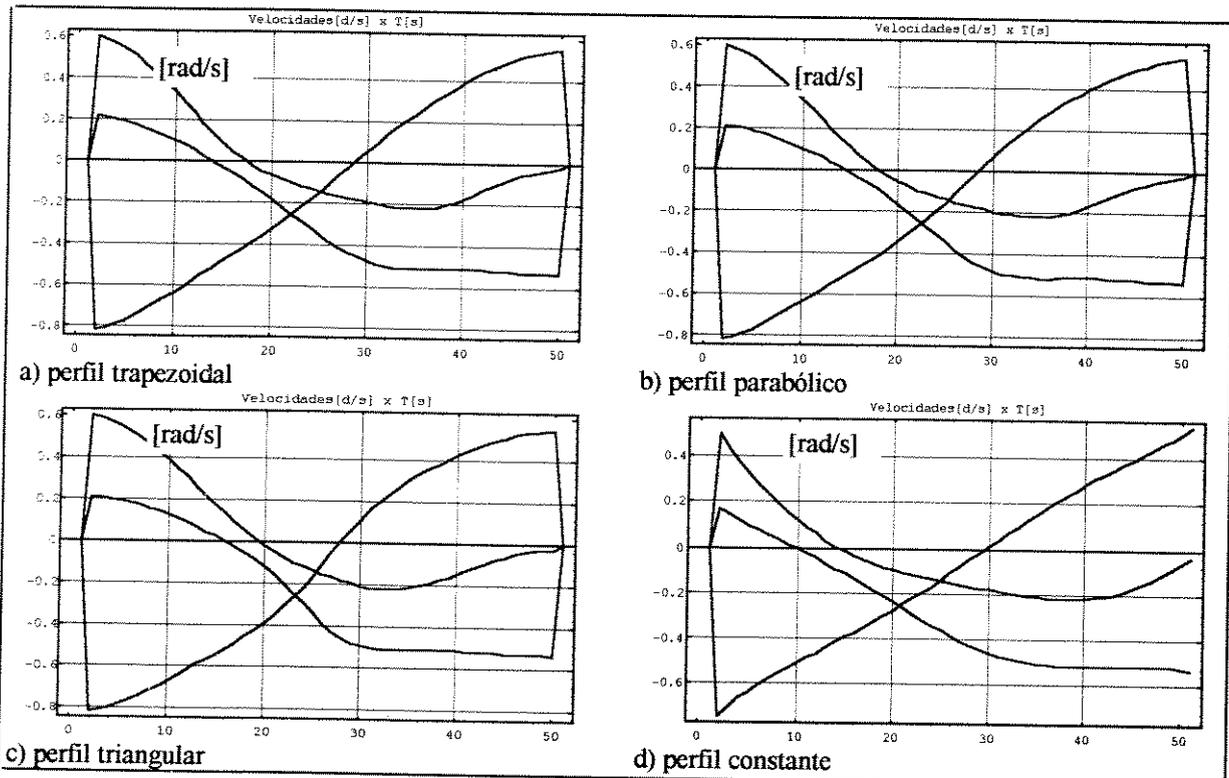


Figura 4.47: Velocidades das três juntas do robô em [rad/s], com quatro diferentes perfis de tempo para garra.

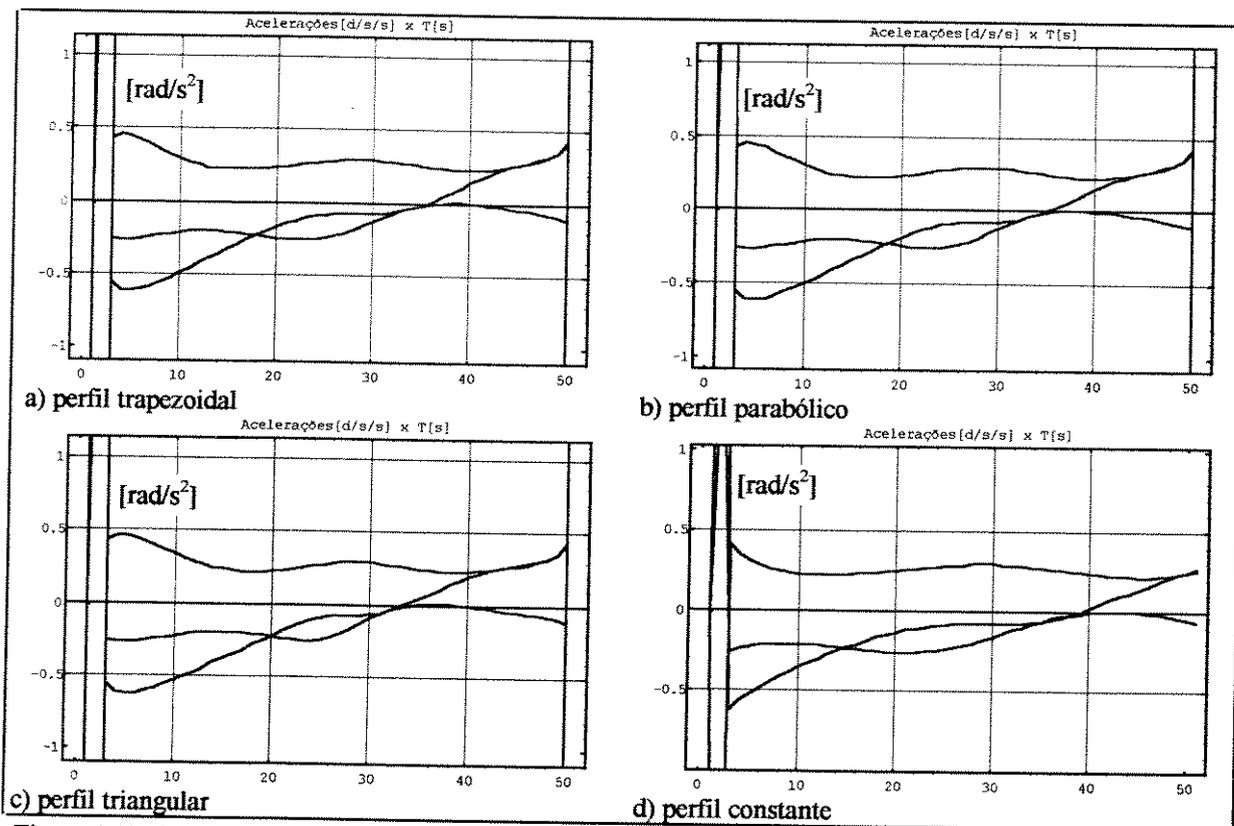


Figura 4.48: Acelerações das três juntas do robô em [rad/s²], com quatro diferentes perfis de tempo para garra.

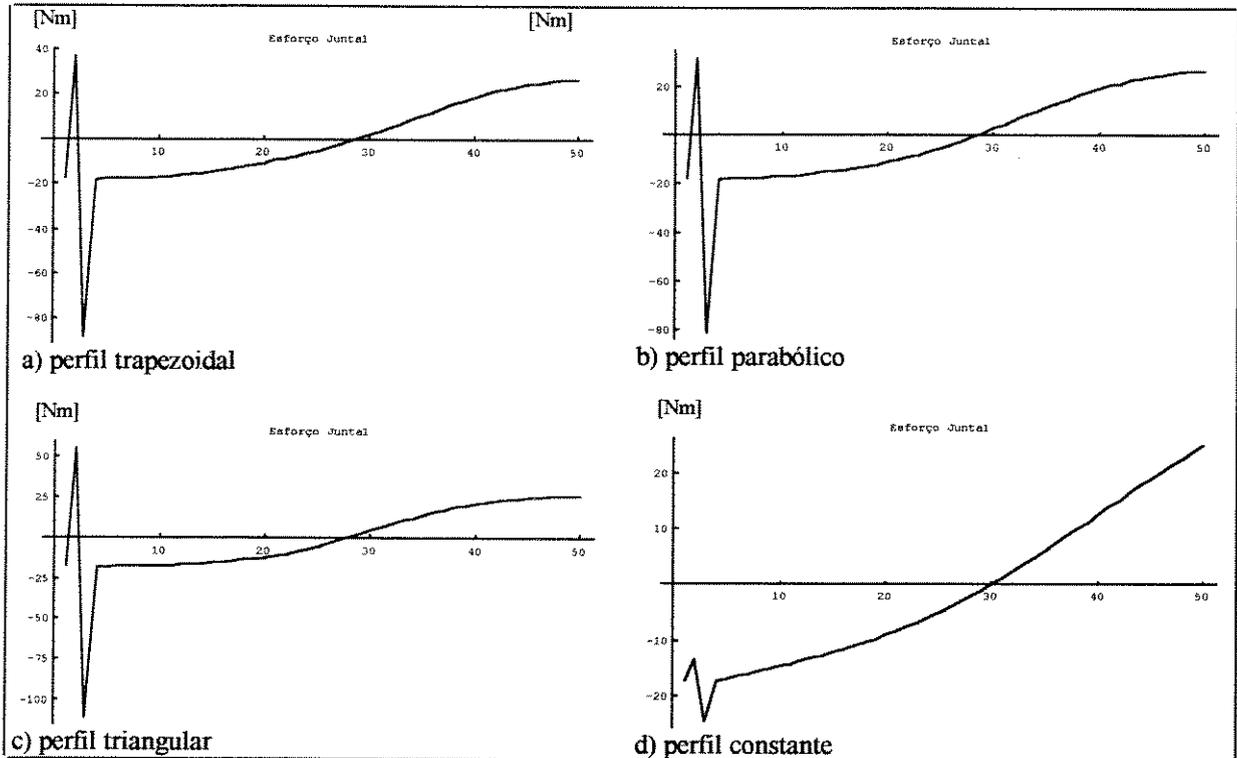


Figura 4.49: Esforços da junta 1 do robô, com quatro diferentes perfis de variação de tempo para garra.

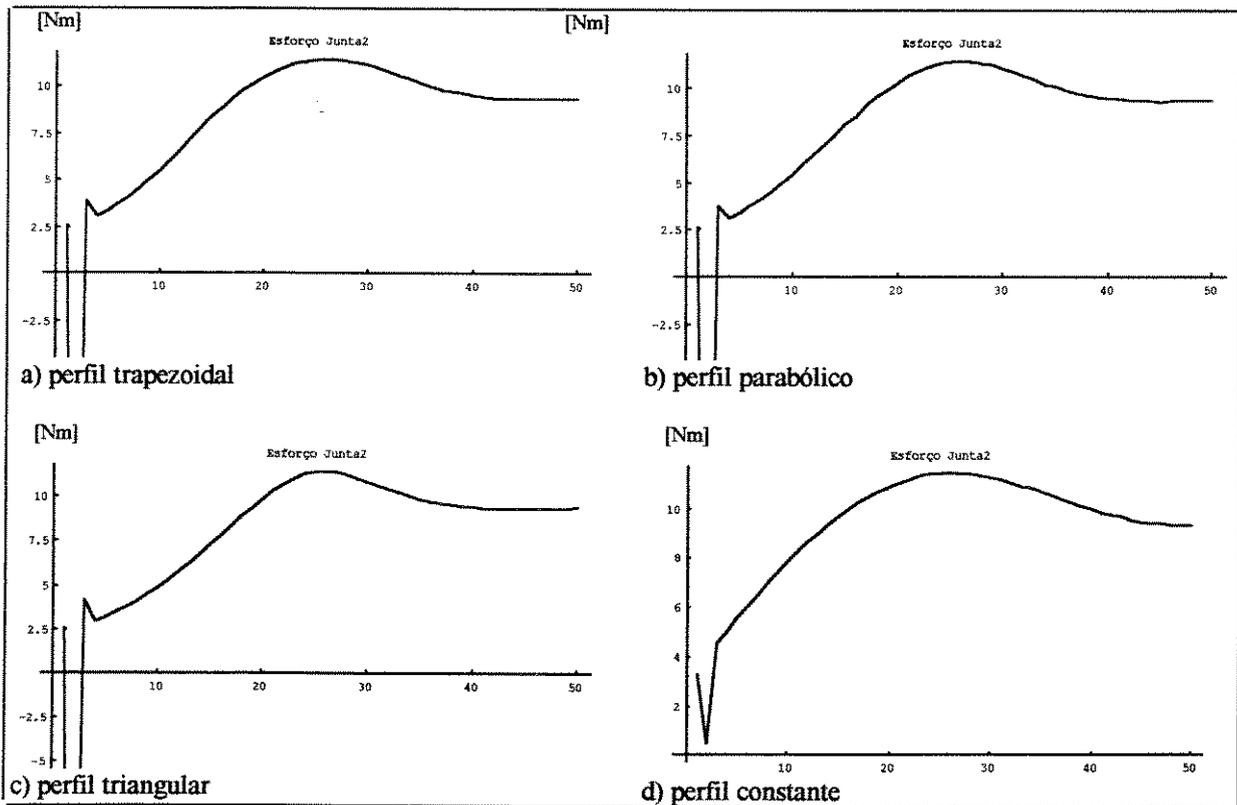


Figura 4.50: Esforços da junta 2 do robô, com quatro diferentes perfis de variação de tempo para garra.

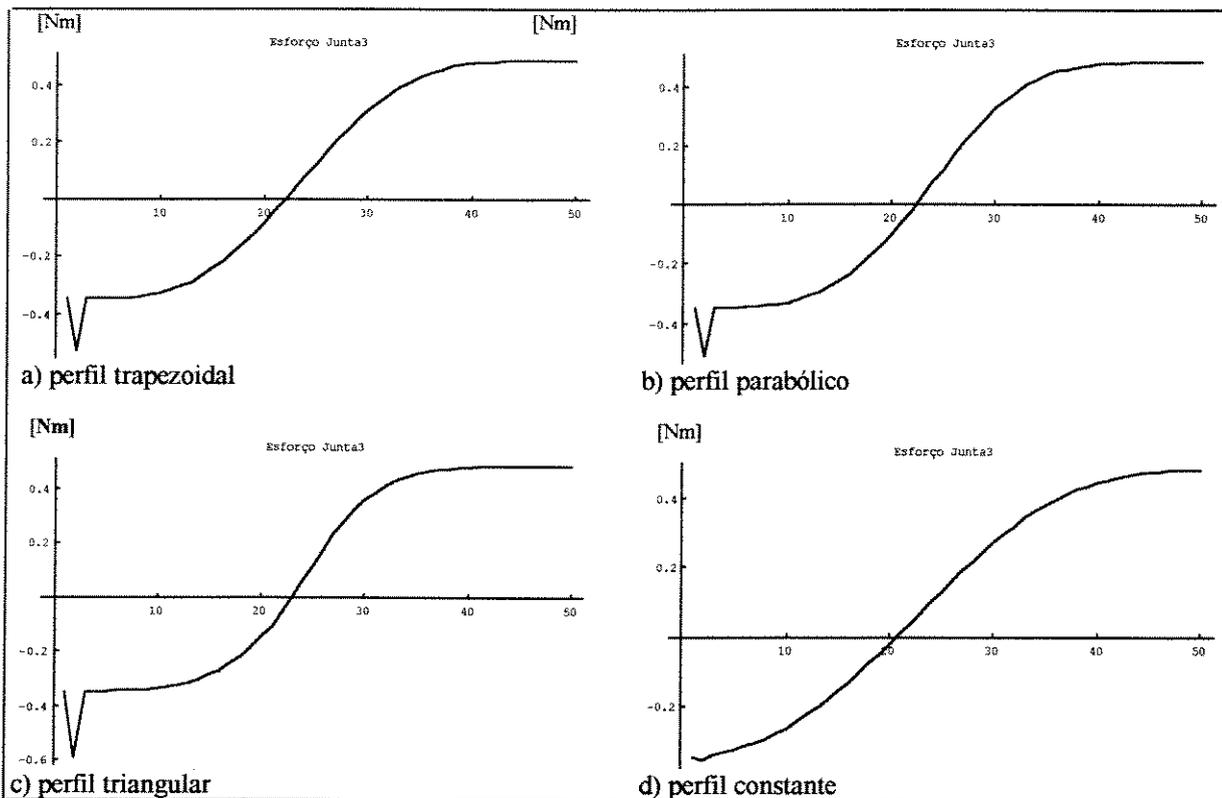


Figura 4.51: Esforços da junta 3 do robô, com quatro diferentes perfis de variação de tempo para garra.

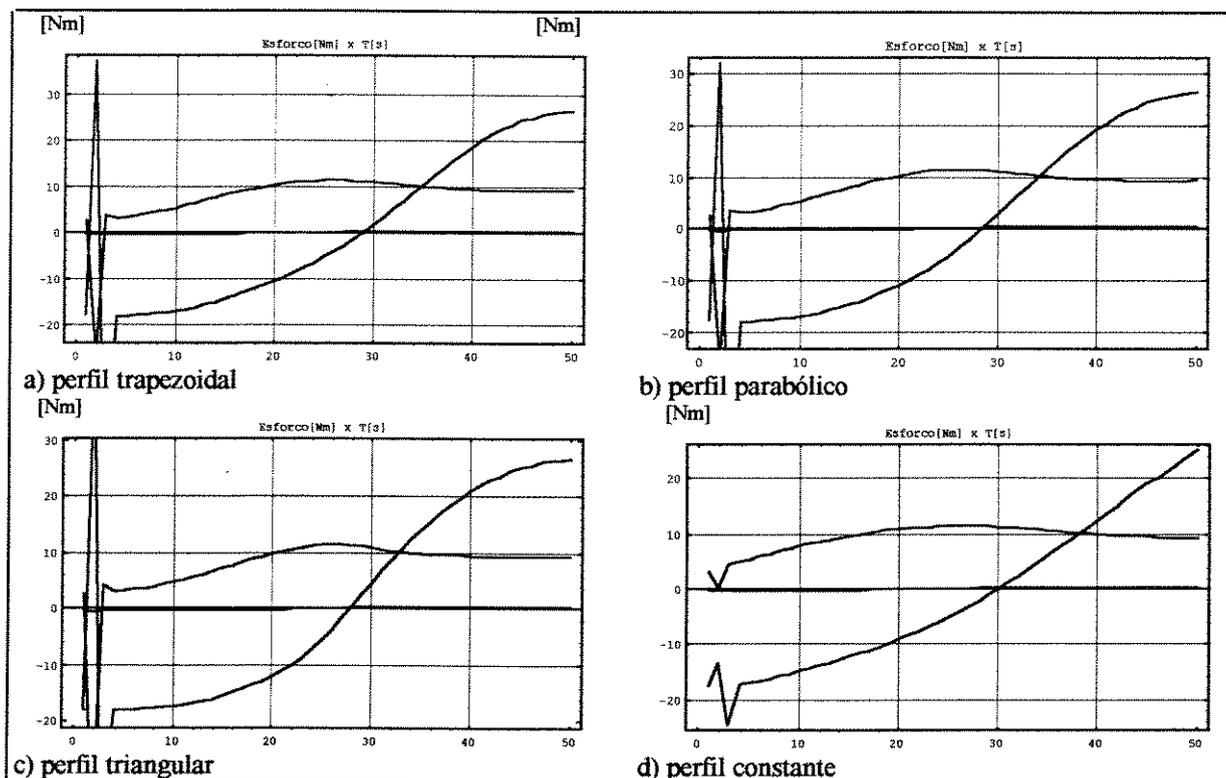


Figura 4.52: Esforços das três juntas do robô, com quatro diferentes perfis variação de tempo para garra.

Os gráficos apresentados anteriormente, mostram que o emprego de diferentes perfis de variação do parâmetro tempo, não muda muito a resposta dos esforços das juntas, as modificações que porventura ocorrem no caso do perfil de variação de tempo constante, são decorrentes do fato de que naquele caso, a variação de tempo não é nula no início e da tarefa, reduzindo-se os picos de velocidades, acelerações que são parâmetros da modelagem, influenciando diretamente na resposta dinâmica.

4.3.5 Mudança na Duração da Tarefa.

Esta análise, visa verificar a influência das alterações causadas nos esforços das juntas devido ao aumento e a diminuição do tempo de execução. O modelo usado para este estudo é o mesmo mostrado na figura 4.3, compare aquelas respostas cinemáticas com aquelas das figura 4.53 a 4.55. Os parâmetros da tabela 4.12 fornecem as condições e características do manipulador, assim, o banco de dados usado pelo AMODIRO para esta análise se encontra na listagem B.2 do anexoB.

ORDEM	ITEM	DESCRIÇÃO DO ITEM
a	Número de pontos de amostragem	50 pontos
b	Tipo de garra	Simplex
c	Tipo de robô	Cotovelo planar
d	Perfil de Tempo	Não importa
e	Centro de massa	Metade do elo - Eixo do elo
f	Algoritmo cinemático	Aproximação polinomial
g	Cinemática	Cotovelo acima
h	Estrutura	Simplex tipo cotovelo
i	Modelo Dinâmico	Adaptativo gerado pelo programa (AMODIRO)
j	Carga na garra	nula
k	Trajeto	reta ligando (-0.3 , 0.9, 0.0) a (0.8 , 0.1, 0.0)
l	Comprimento da elo 1	50 [cm]
m	Comprimento da elo 2	50 [cm]
n	Comprimento da garra	10 [cm]
o	Duração da tarefa	1) 2[segundos] 2) 4[segundos] 3) 6[segundos]
p	Orientação da garra	variando de 135° até 10°
q	Classe do robô	SSS-RRR-xxx-123
r	Graus de liberdade	3 GL

Tabela 4.12: Condições e características do manipulador para análise da mudança do tempo de execução.

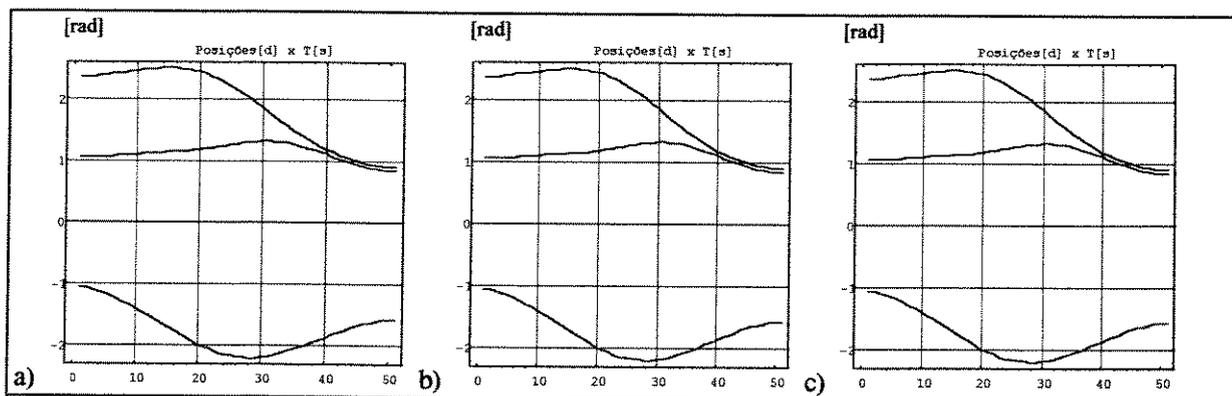


Figura 4.53: Ângulos das três juntas para de tarefa executada em: a) dois, b) quatro e c) seis segundos.

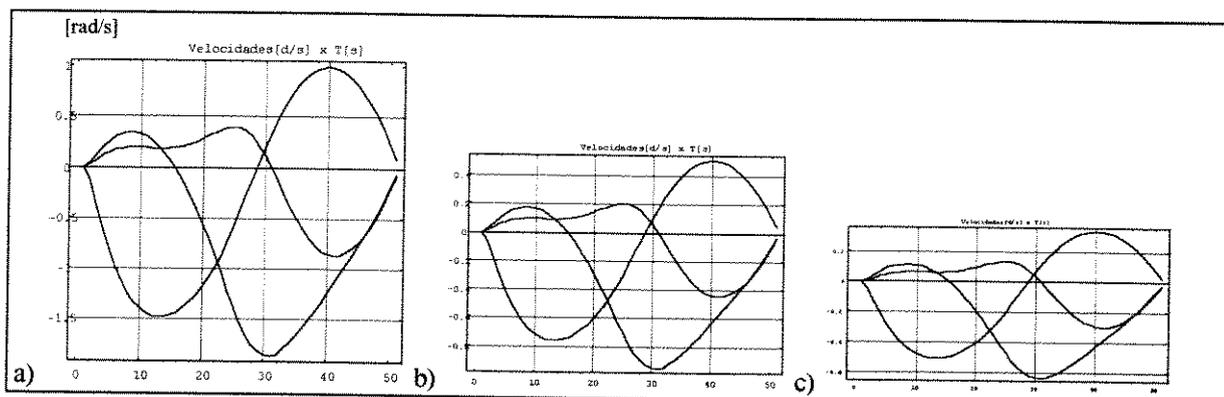


Figura 4.54: Velocidades das três juntas para de tarefa executada em: a) dois, b) quatro e c) seis segundos.

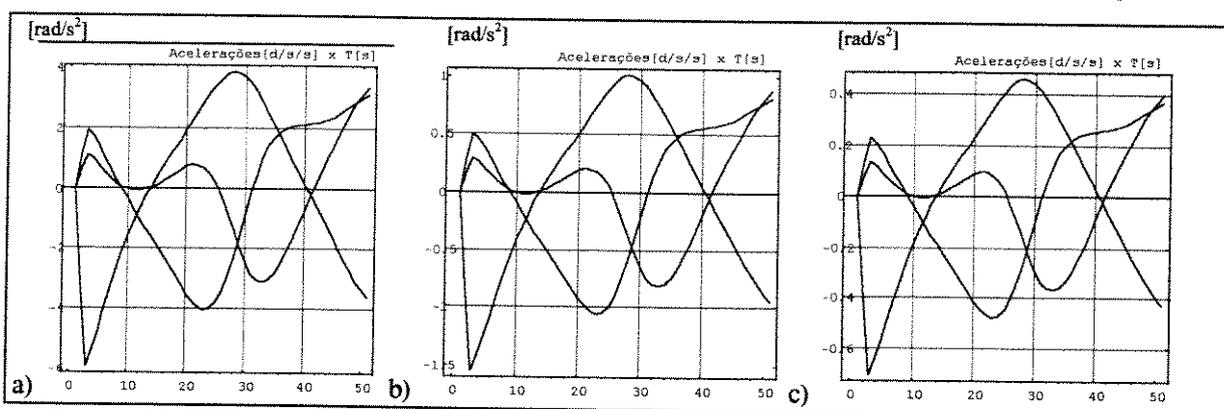


Figura 4.55: Acelerações das três juntas para de tarefa executada em: a) dois, b) quatro e c) seis segundos.

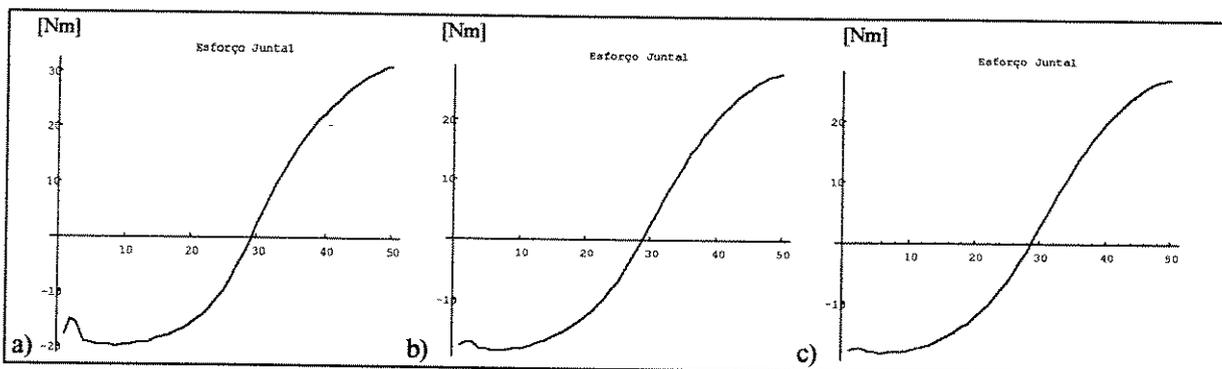


Figura 4.56: Torques da junta 1 para de tarefa executada em: a) dois, b) quatro e c) seis segundos.

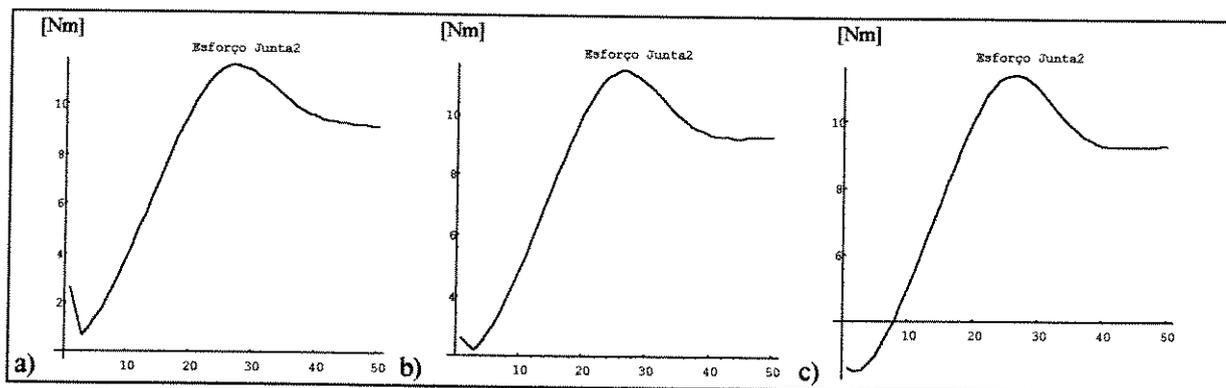


Figura 4.57: Esforços da junta 2 para de tarefa executada em: a) dois, b) quatro e c) seis segundos.

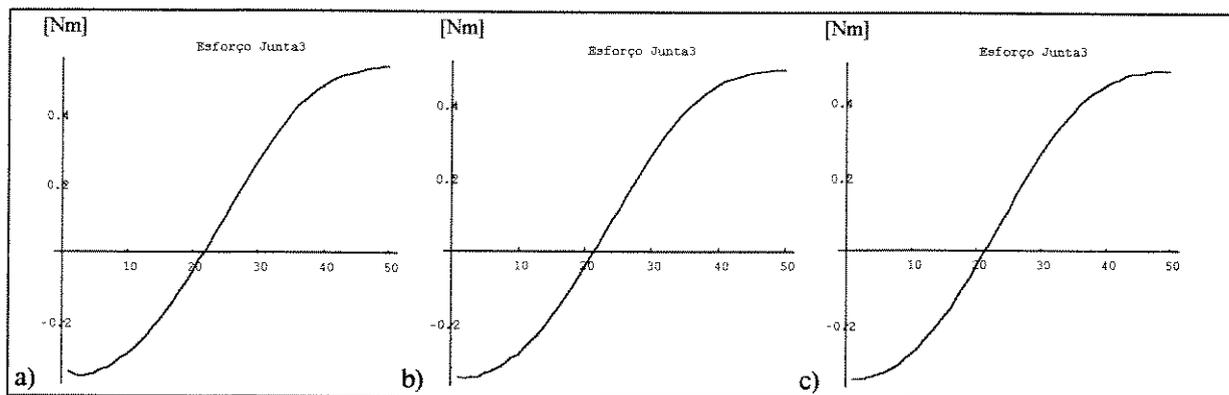


Figura 4.58: Esforços da junta 3, para de tarefa executada em: a) dois, b) quatro e c) seis segundos.

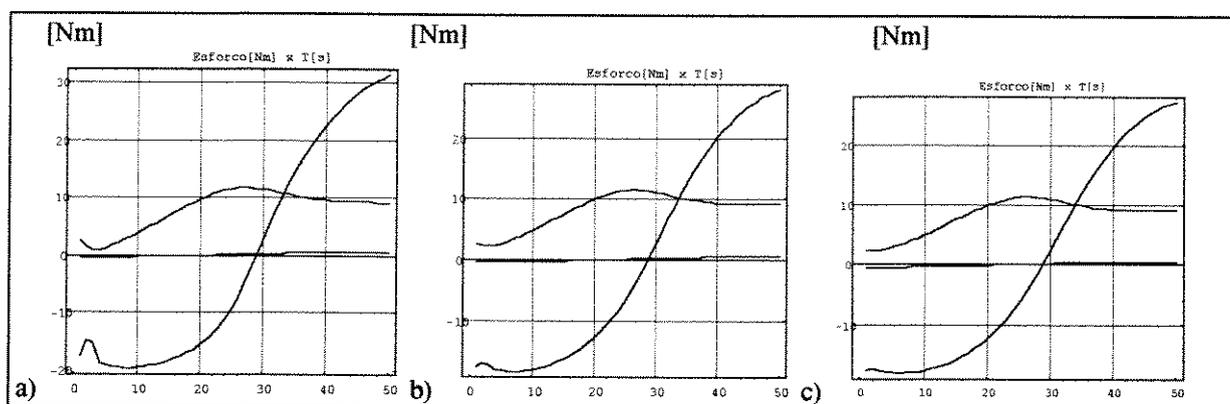


Figura 4.59: Esforços das três juntas para de tarefa executada em: a) dois, b) quatro e c) seis segundos.

Baseado nos perfis cinemáticos, pode-se constatar que a aceleração e a velocidade são intensificadas com o aumento do tempo de execução, conforme esperado, ver figuras 4.54 e 4.55 que quanto à forma são semelhantes mas principalmente os gráficos de aceleração das figuras 4.55b e 4.55c, são extremamente pequenos comparando as amplitudes das acelerações em relação ao gráfico 4.55a. O perfil da posição angular figura 4.53, mantém a forma, para um tempo menor. Em cada uma destas figuras, foi feita uma simulação para uma tarefa com duração de 2, 4 e 6 segundos.

Sobre o comportamento dinâmico, foi verificado que a forma e intensidade de torque ou esforço pouco variou, com a modificação do tempo de execução da tarefa, Isto pode ser verificado analisando-se os esforços da junta 1, 2 e 3 apresentados respectivamente nas figuras 4.56, 7,57 e 7,58, e para visualização da intensidade relativa dos torque de todas as juntas ver figura 4.59.

A pequena diferença que pode ser verificada nos torques, visto na figura 4.59, está relacionada as contribuição dos atritos viscosos, forças centrífugas e de coriolis que dependem das acelerações e velocidades intensificadas com a redução do tempo de execução da tarefa.

Como comprovado através dos gráficos da ultima simulação, os valores de torque de pico e eficaz são poucos sensíveis ao aumento do tempo de execução da tarefa, influenciando pouco nos critérios de seleção de atuadores por taxa de potência e de aquecimento. Entretanto, constata-se um aumento da potência requerida com o acréscimo da velocidade, e redução de tempo, pois a potência é proporcional ao torque e velocidade. Como a velocidade aumenta, apesar do torque manter constante, pode se verificar um aumento de potência, conseqüentemente o motor requerido para acionar estas juntas deve ter melhor aceleração e velocidade, conforme o tempo de execução seja reduzido.

4.3.6 Adaptabilidade da Modelagem Dinâmica aos Parâmetros Geométricos.

A adaptabilidade da modelagem é a capacidade deste modelo incorporar as alterações conforme as modificações introduzidas nas estruturas dos elos do manipulador, pela inserção de componentes do sistema de acionamento das juntas como atuadores, redutores, etc. Isto bem analisado também apresentado também na seção 4.2.2, onde se compara as equações dinâmicas de um robô planar apresentadas em [LATRE, 92] que são específicas daqueles modelos com aquelas características, e não permite o acesso a alguns parâmetros como os centros de massas, os momentos de inércias, e a massa da carga do robô, o que a caracteriza como uma equação não adaptativa.

A equação dinâmica introduzida por [LATRE 88], é colocada na íntegra no programa ALSIMOPLA - Algoritmo com Equações Dinâmicas Não adaptativos de um Manipulador Planar, e é uma equação fixa, e tem como parâmetros, o comprimento e as massas dos elos, e se for introduzido um motor na estrutura de um determinado elo, pode-se computar como parte integrante deste elo, apenas a massa do motor inserido neste modelo, não podendo se considerar as modificações dos momentos de inércias e centro de massas do motor sobre o elo, por isto foi chamada de modelo dinâmico não adaptativo.

Já o programa, AMODIRO, da seção 3.7 conta com o auxílio do programa AFICESE, da seção 3.9, realizam a modelagem dinâmica usando o método da equações dinâmicas de Euler Lagrange apresentado em [SPONG 89]. Assim cada alteração ocorrida na estrutura do manipulador, ele remodela ou adapta o modelo dinâmico do manipulador permitindo o acesso aos parâmetros geométricos referidos anteriormente, os insere no modelo da estrutura do manipulador, estabelecendo uma nova equação que leva em conta a configuração do sistema de acionamento na hora de gerar o modelo dinâmico, o que diminui os erros na hora de calcular os atuadores de determinada estrutura. O modelo com esta adaptabilidade foi chamado de modelo dinâmico adaptativo.

ORDEM	ITEM	DESCRIÇÃO DO ITEM
a	Número de pontos de amostragem	50 pontos
b	Tipo de garra	Simple
c	Tipo de robô	Cotovelo planar
d	Perfil de Tempo	Não importa
e	Centro de massa	Metade do elo - Eixo do elo
f	Algoritmo cinemático	Aproximação polinomial
g	Cinemática	Cotovelo acima
h	Estrutura	Simple tipo cotovelo
i	Modelo Dinâmico	Adaptativo gerado pelo programa (AMODIRO) Não adaptativo contido no programa (AHOVATA)
j	Carga na garra	nula
k	Trajeto	reta ligando (-0.3 , 0.9, 0.0) a (0.8 , 0.1, 0.0)
l	Comprimento da elo 1	50 [cm]
m	Comprimento da elo 2	50 [cm]
n	Comprimento da garra	10 [cm]
o	Tempo de percurso, ou tarefa	5 [segundos]
p	Orientação da garra	variando de 135° até 10°
q	Classe do robô	SSS-RRR-III-B12 e SSS-RRR-DDD-123
r	Graus de liberdade	3 GL

Tabela 4.12: condições e características do manipulador para análise da variância do modelo apresentado.

Os dois tipos de estruturas mais comumente utilizados no mercado, são aquelas do tipo indireto local SSS-RRR-III-B12, e direta SSS-RRR-DDD-123, conforme classificação da seção 2.3 do capítulo

2, e ilustradas nas figuras 4.27a, e 4.27b respectivamente. Combinações delas, também podem ser usadas, e é por isto que foram adotados para verificar sensibilidades deste dois tipos de modelagem dinâmica, e as características e condições dos modelos são ilustradas, na tabela 4.12., e a listagem B.6 do anexo B, contém o banco de dados básico para iniciar a simulação.

O comportamento dinâmico, em função do tipo da variância do modelo usado, conforme definido neste item, é ilustrado nas figuras 4.60 a 4.63, onde os gráficos do lado direito referem-se ao emprego do modelo dinâmico **não adaptativo**, e os da esquerda referem-se ao emprego do modelo dinâmico **adaptativo**, em cada figura, os gráficos, representam configurações de acionamento do tipo: **direto, indireto, e de estrutura isolada de cima para baixo**.

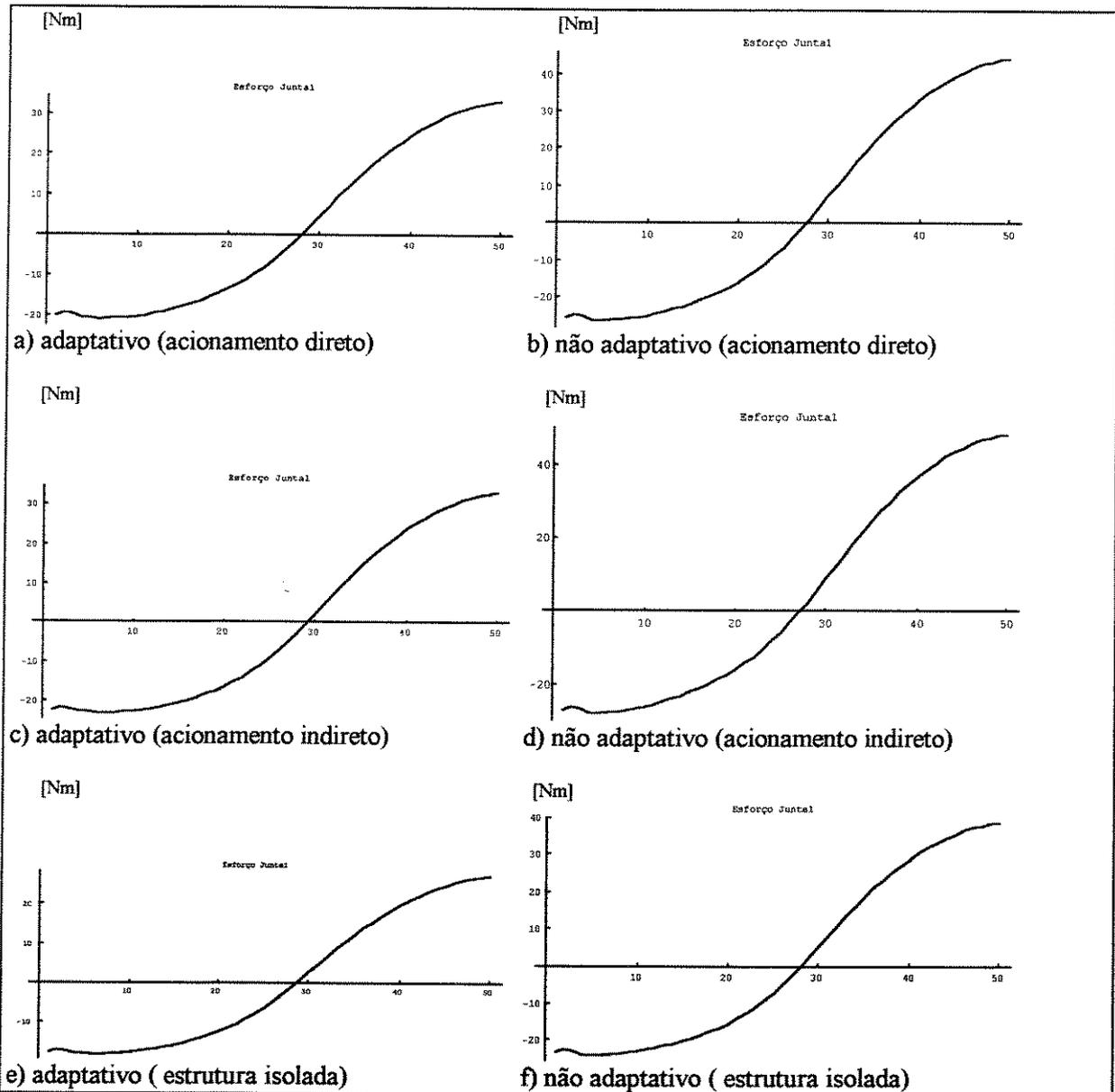


Figura 4.60: Esforços da junta 1, comparação das respostas para modelos dinâmicos adaptativos e não adaptativos

A figura 4.60, encerra as curvas de esforços para a junta 1, a figura 4.61 ilustra o perfil de torque para a junta 2, a figura 4.62 mostra os esforços para a junta 3, e finalmente a figura 4.62 que

aglomera nos mesmos gráficos os perfis de esforços de todas a juntas para que se possa ter uma idéia da intensidade de torque requerido por cada junta relativamente as demais.

Nesta análise, verifica-se que o torque das juntas 1 e 2 é bem menor para o emprego do modelo adaptativo, e que o torque da junta 3 fica dez vezes menor quando estimado com o uso do modelo não adaptativo.

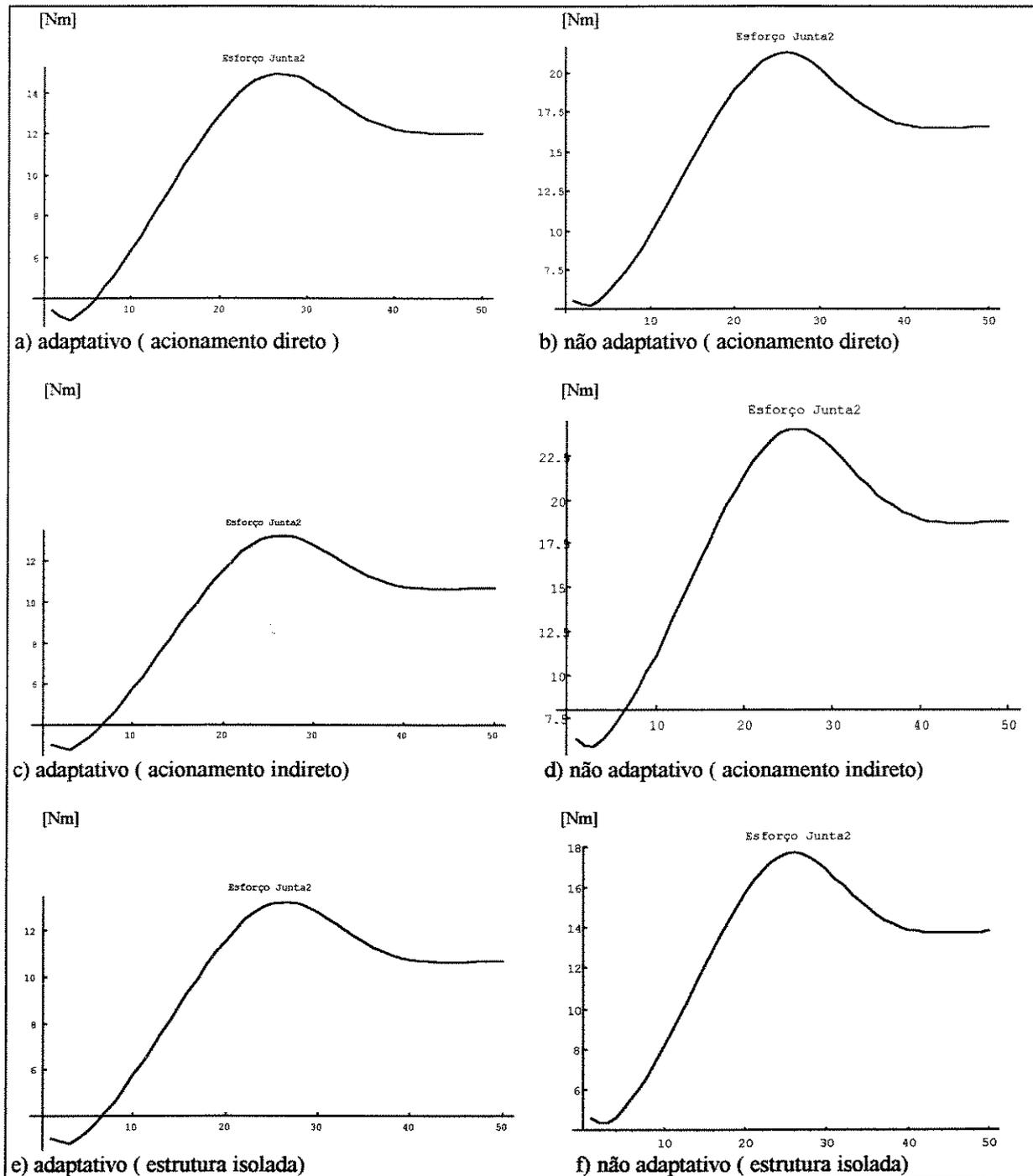


Figura 4.61: Esforços da junta 2. Comparação das respostas para modelos dinâmicos adaptativos e não adaptativos

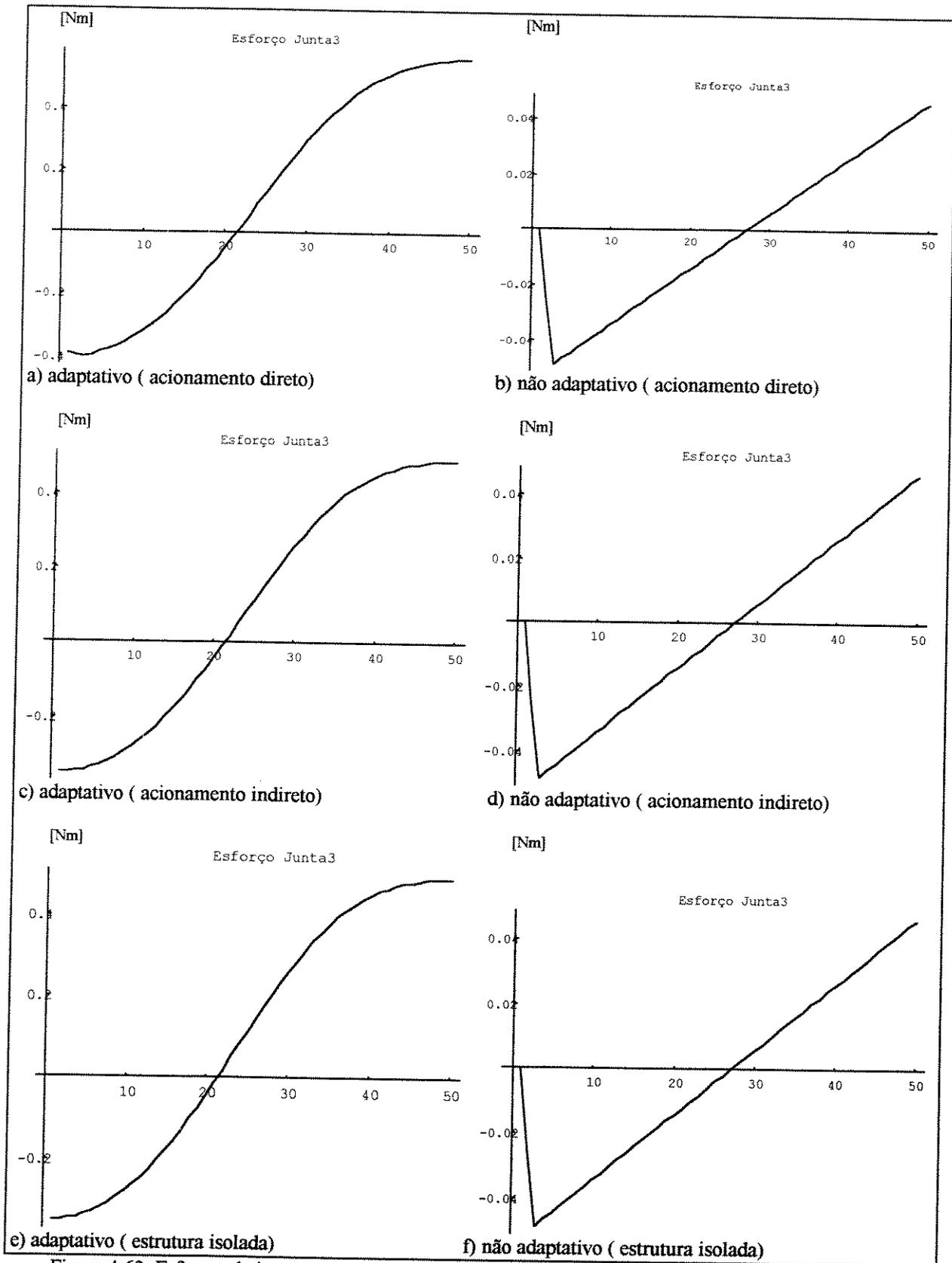


Figura 4.62: Esforços da junta 3, comparação das respostas para modelos dinâmicos adaptativos e não adaptativos

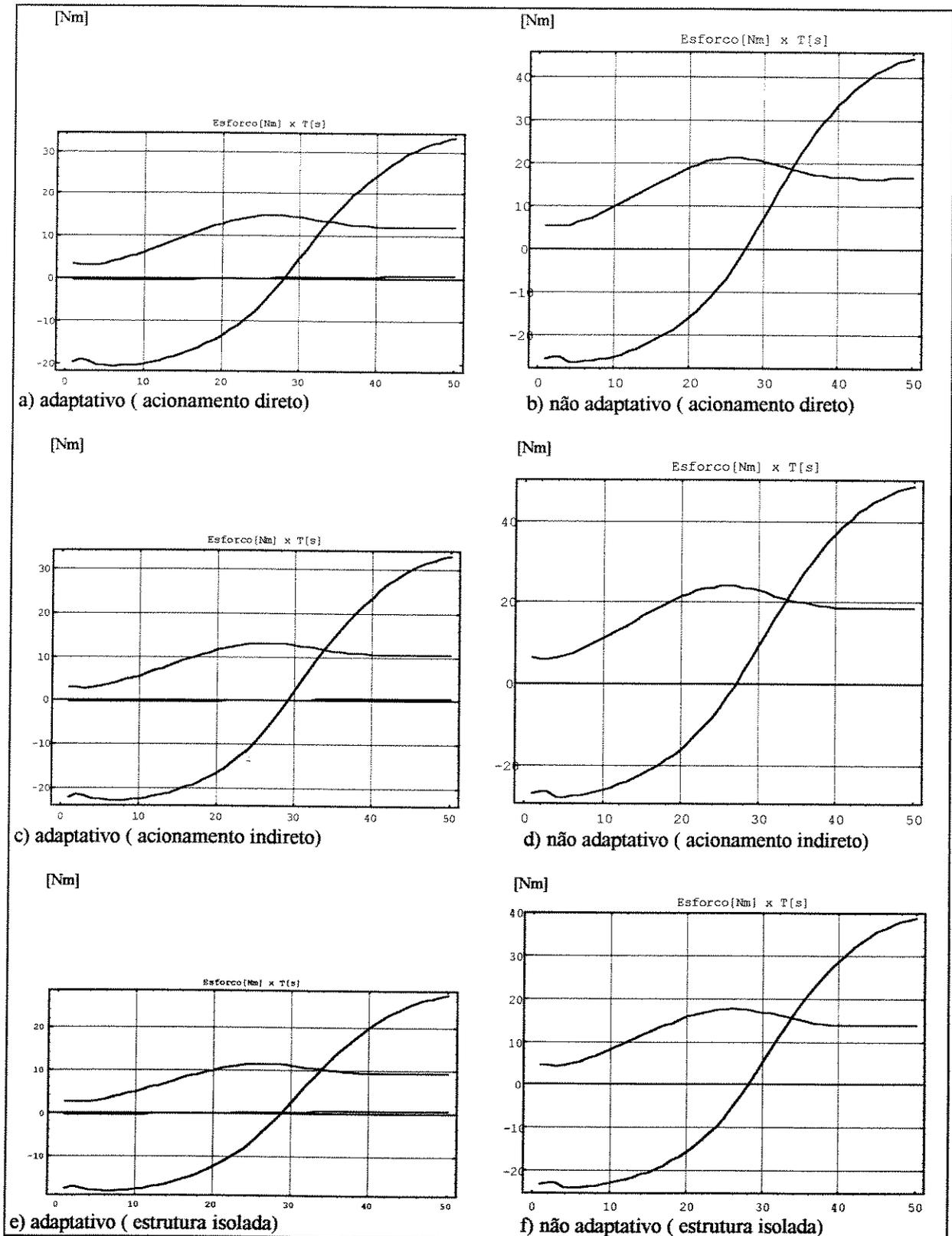


Figura 4.63: Esforços para as três juntas, comparação das respostas para modelos dinâmicos adaptativos e não adaptativos

Uma diferença fundamental da resposta do modelo dinâmico adaptativo comparada com a resposta do modelo não adaptativo, está na capacidade do modelo adaptativo, assumir imposições da localização do centro de massa, enquanto que o modelo não adaptativo não aceita isto, pois naquele caso o valor do centro de massa localiza na ponta sendo inerente daquelas equações em função das dimensões dos elos, o que impõe um torque maior, enquanto o modelo adaptativo fica sensível a estas alterações, a exemplo do centro de massa do elo jogado para o meio do elo.

4.3.7 Diferentes Cargas ou Esforços Externos na Garra.

A última análise a ser feita para o modelo dinâmico, é a verificação da sensibilidade do modelo às modificações da carga, que a garra irá sustentar no extremo da cadeia cinemática do manipulador. Para esta análise será usado os dois modelos utilizados no experimento anterior, mas agora serão usados com carga e sem carga, na garra, conforme condições estabelecidas na tabela 4.14. O banco de dados básico para este cálculo, está representado na listagem B.7 do anexo B.

ORDEM	ITEM	DESCRIÇÃO DO ITEM
a	Número de pontos de amostragem	50 pontos
b	Tipo de garra	Simples
c	Tipo de robô	Cotovelo planar
d	Perfil de Tempo	Não importa
e	Centro de massa	Metade do elo - Eixo do elo
f	Algoritmo cinemático	Aproximação polinomial
g	Cinemática	Cotovelo acima
h	Estrutura	Simples tipo cotovelo
i	Modelo Dinâmico	Adaptativo gerado pelo programa (AMODIRO)
j	Carga na garra	1) massa=0.0 [g], Momento inercial=0.0 [Nm s ²] 2) massa=220.0 [g], Momento inercial=0.0123 [Nm s ²]
k	Trajeto	reta ligando (-0.3 , 0.9, 0.0) a (0.8 , 0.1, 0.0)
l	Comprimento da elo 1	50 [cm]
m	Comprimento da elo 2	50 [cm]
n	Comprimento da garra	10 [cm]
o	Tempo de percurso, ou tarefa	5 [segundos]
p	Orientação da garra	variando de 135° até 10°
q	Classe do robô	SSS-RRR-DDD-123 ou SSS-RRR-III-B12
r	Graus de liberdade	3 GL

Tabela 4.14: Condições do manipulador para análise da alteração carga ou esforços externos na garra.

Estabelecidas estas considerações, e efetuadas as simulações, chegou-se nos gráficos das figuras, 4.64, para os esforços da junta 1, 4.65 para os torques da junta 2, e 4.66 para as junta 3, isoladas, e figura 4.67, contendo as curvas aglomeradas de esforços para todas as juntas que permite tirar uma noção da intensidade relativa entre elas. Os gráficos das partes superiores das figuras, representam os casos de acionamento direto, e do lado inferior os casos de acionamento indireto, e os gráficos do lado direito representam os resultados para manipuladores com garra livre ou seja, sem carga, conforme descrição marcada da tabela 4.13, e os gráficos do lado esquerdo, são para os resultados para os casos em que a carga é considerada não nula.

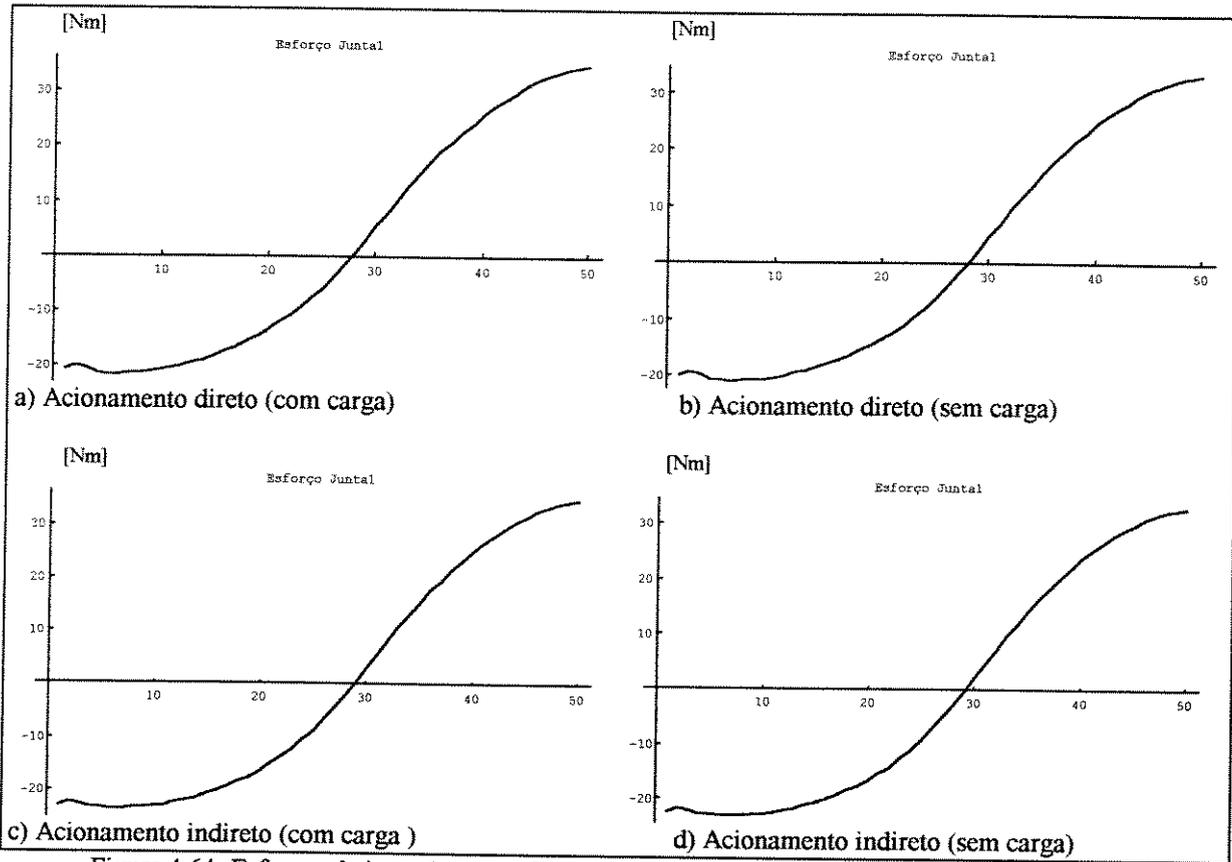


Figura 4.64: Esforços da junta 1 para análise da alteração da carga ou esforços externos na garra

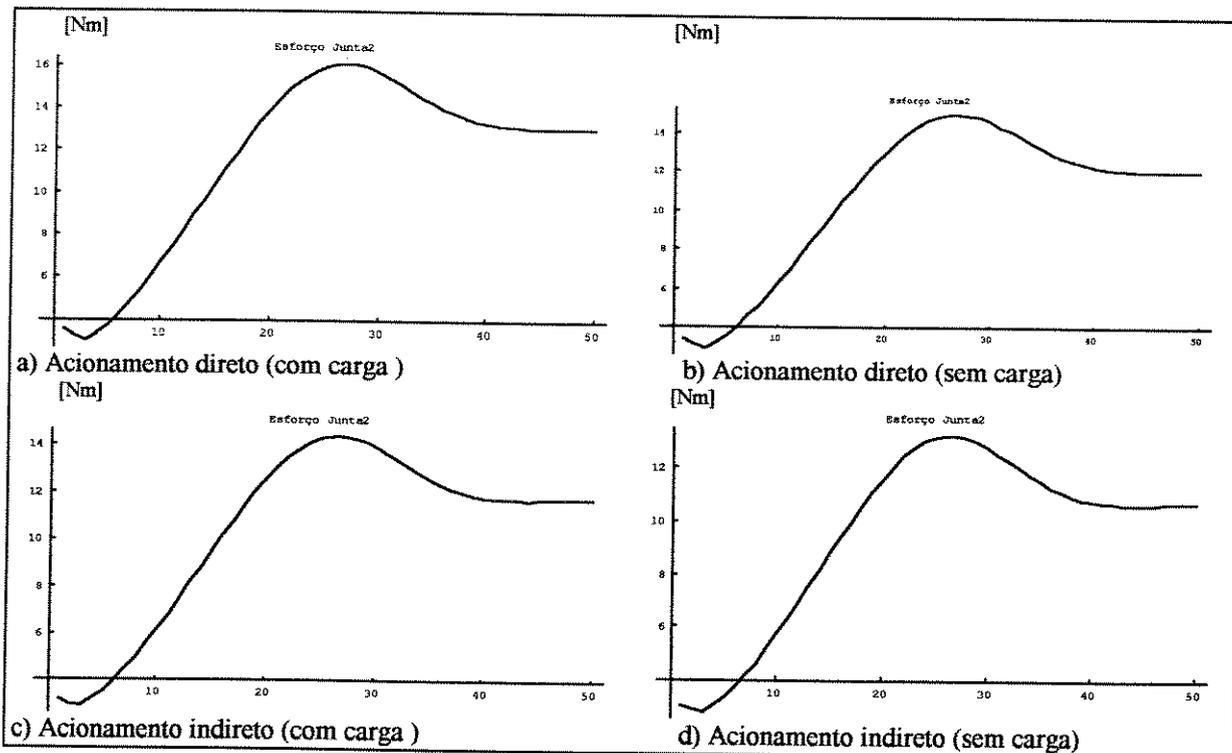


Figura 4.65: Esforços da junta 2 para análise da alteração da carga ou esforços externos na garra

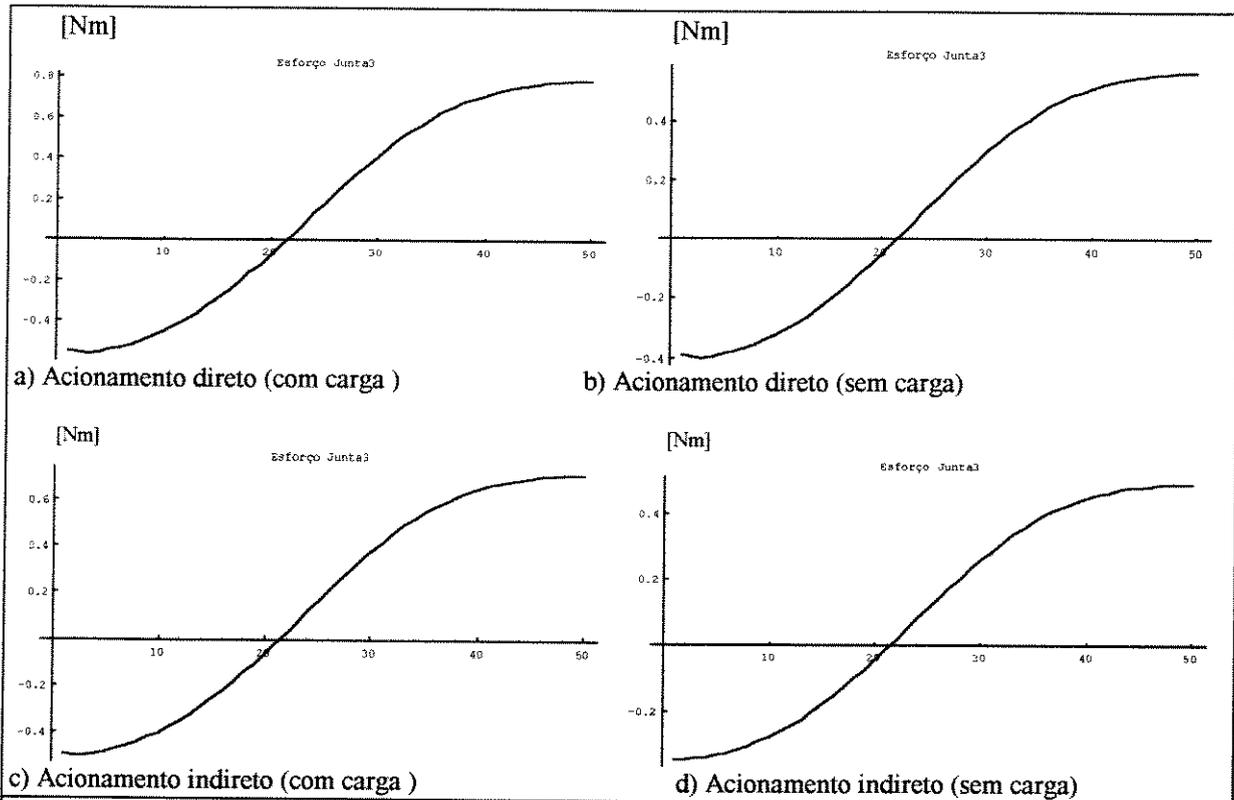


Figura 4.66: Esforços da junta 3 para análise da alteração carga ou esforços externos na garra.

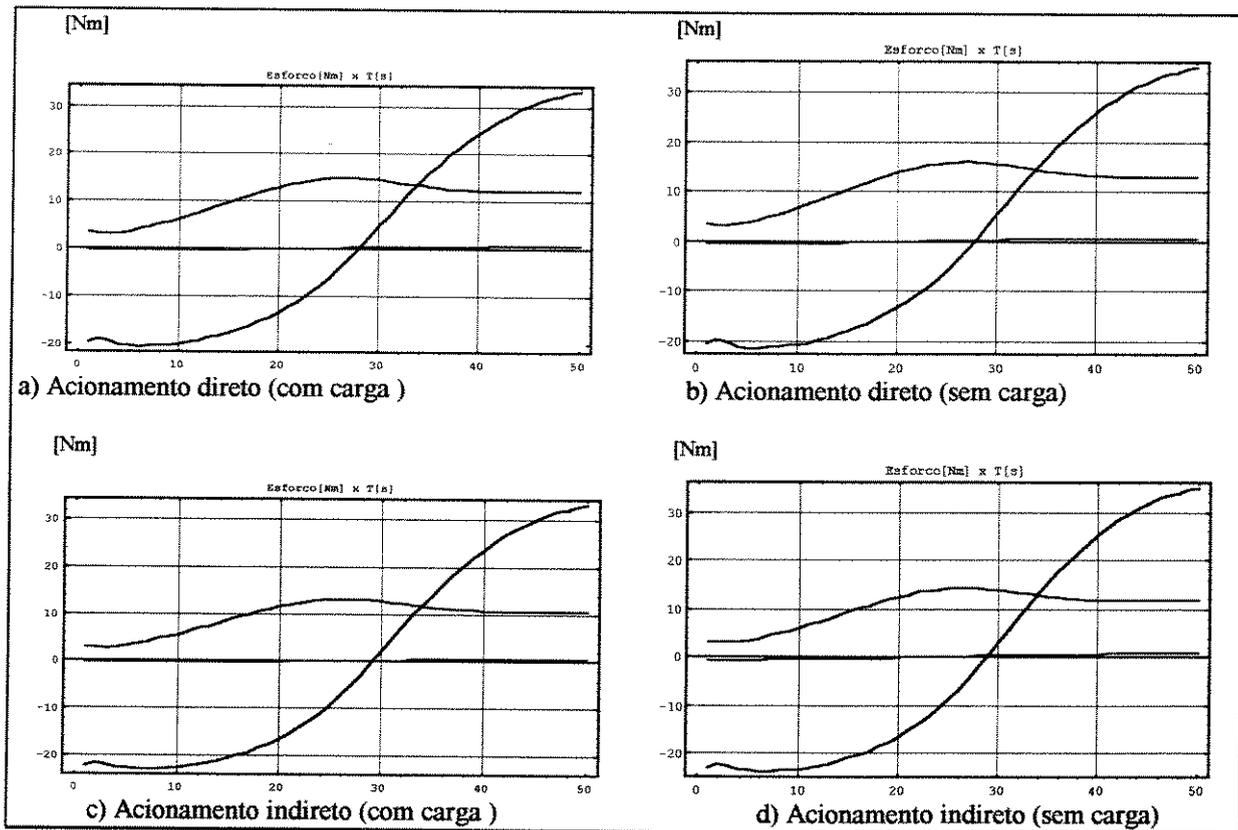


Figura 4.67: Esforços das 3 juntas para análise da alteração da carga ou esforços externos na garra.

Baseado nos últimos resultados pode-se verificar que as curvas de esforços aumentam significativamente para sistemas carregados, isto mostra que o modelo usado é sensível, em cada junta, a presença e intensidade de cargas na garra. Pode-se ver que esta sensibilidade é maior nos elos da ponta, isto é justificado pela quantidade de massa aumentando a inércia dos elos mais próximos da base que filtra dinamicamente, as interferências da carga, uma vez que a razão entre as massas da carga e as massas dos elos é maior tanto quanto mais se aproxima dos elos da base.

Encerrada esta última análise sobre a sensibilidade do modelo dinâmico, fica comprovado, que ele é válido para gerar equações algébricas de modelos dinâmicos de diversos manipuladores. Que sua resposta é comparável com aquelas conhecidas na bibliografia, para as condições por eles impostas, e que esta modelagem é sensível aos fatores: a) centros de massa dos elos do manipulador, b) ao desequilíbrio ou momento gravitacional em torno dos eixos, c) a posição dos atuadores para compensação de desequilíbrio em torno dos eixos, d) à distribuições de atuadores conforme a configuração do acionamento, e) aos algoritmos cinemáticos empregados para determinação da trajetória da garra, f) às diferentes forma de trajetórias impostas a garra, g) as diferentes formas de perfis de tempo usados para geração destas trajetórias, h) a mudança do tempo de execução da tarefa, i) a adaptabilidade do modelo dinâmico, e j) as diferentes cargas ou esforços feitos pela garra do manipulador. Estas características transformam esta modelagem num excelente instrumento para estudo do comportamento dinâmico, que leva em conta as condições e características mais importantes de um robô, da tarefa, do ambiente, e dos próprios atuadores incorporados, melhorando e aumentando a precisão do processo de seleção de manipuladores.

4.4 Análise da Influência dos Parâmetros de Carga, Acoplamento, Motores, e Ambiente, nos Parâmetros de Seleção de Atuadores.

Nesta seção serão apresentados alguns gráficos e ábacos que ilustram o comportamento dos parâmetros intermediários do processo de seleção de atuadores e acessórios analisados no capítulo 3, conforme os principais parâmetros básicos requeridos, tais como: parâmetros de carga, como momento de inércia; viscosidade; aceleração e velocidade e perturbações; parâmetros de acoplamento, como o rendimento; parâmetros de motores, como corrente elétrica de pico e resistência do enrolamento da armadura, constante de torque, temperatura máxima suportável e resistência térmica da armadura, viscosidade e momento de inércia do eixo do motor, que são obtidos por ensaios, retirados de placas de identificação ou catálogos, parâmetros do ambiente de operação como aceleração gravitacional e temperatura ambiente máxima, que influenciam nos principais parâmetros do processo de seleção de atuadores das juntas de um manipulador.

No processo de seleção de motores, para acionamento indireto, são definidos, parâmetros e funções de seleção de atuadores, intermediários e primários ou diretos, apresentados no capítulo 3. Os parâmetros intermediários mais importantes, grau de aquecimento e de acoplamento, taxa de acoplamento, e de aquecimento de carga para as taxas de aquecimento e de potência de carga mínima.

Para a verificação do comportamento dos parâmetros e funções de seleção de atuadores, foram usados alguns algoritmos que mostram o comportamento dos parâmetros e funções de seleção de atuadores primários e diretos, a partir de séries de cada parâmetro de carga, motores, acoplamento e ambiente de operação.

Estes parâmetros foram obtidos através de catálogos, placas, baseados em artigos como [SHNEYDOR 89], [LATRE 88] e os catálogos [DIRECT DRIVE] [MOTION CONTROL] e [DC

MOTOR 73], ou gerados aleatoriamente, com o único compromisso de gerar os gráficos desta seção para permitir uma visualização dos comportamentos dos parâmetros intermediários de seleção, vide tabelas 4.15 e 4.16, cujas linhas representam os parâmetros básicos, e as colunas numeradas as seqüências e ordem das ocorrências. Os parâmetros das listas B.3 e B.4 são respectivamente os mesmos encontrados nas quartas colunas das duas tabelas citadas. Na geração de cada gráfico varia-se o parâmetro de interesse no gráfico, conforme a coluna da tabela referente ao mesmo, e fixa-se os demais parâmetros conforme as listas do anexo B, utilizando-se as equações do capítulo 3, para se avaliar as influências no processo.

Parâmetro \ tolerância	1	2	3	4	5	6	Símbolo	unidades
Viscosidade da carga	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	Bc	Nm/(rad/s)
Momento de inércia da carga	25	75	125	175	225	275	Jc	Nm/(rad/s/s)
Torque de perturbação da carga	50	150	250	350	450	550	Text	Nm
Velocidade da carga	1	2	3	4.0	5	6	ω	rad/s
Aceleração da carga	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	α	rad/s/s
Rendimento do acoplamento	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	η	-
Viscosidade do rotor do motor	0.05	0.1	0.15	0.20	0.25	0.30	Bm	Nm/(rad/s)
Momento de inércia do rotor	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	Jm	Nm/(rad/s/s)

Tabela 4.15: Séries de características de carga e do motor que influem na seleção de atuadores.

parâmetros do motor \ tolerância	1	2	3	4	5	6	Símbolos	Unidades
Temperatura Ambiente	25.0	45.0	65.0	85.0	105.0	125.0	Φ_a	oC ambiente
Temperat. máxima	75.0	95	115	135	155	175	Φ_m	oC motor
Constante de torque	179	0, 212	277	342	440	554	kt	Nm/A
Resistência Térmica	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	R θ	W/oC
Resistência elétrica	0.9	1.3	2.1	3.2	5.2	8.2	Ra	Ohms
Corrente de pico	26.8	22.8	14.3	14.0	10.9	8.7	Ip	Amperes
Momento de Inércia do eixo	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	Jm	Nm/(rad/s/s)

Tabela 4.16: Séries Características e condições de operação do motores, para seleção de atuadores.

4.4.1 Taxa de Acoplamento ou de Redução, N_p e N_a .

A taxa de acoplamento, N_p , equações 3.24 a 3.30, 3.43 a 3.48 e 3.151 a 3.156, determina o ponto de acoplamento, em que se tem a taxa potência de acoplamento mínima, que deve ser aquela para a qual a taxa de potência de carga é máxima, e não deve ser superior a taxa de potência suportável pelo motor. Analogamente, a taxa de acoplamento N_a , mostrada nas equações 3.75, 3.124, 3.162, determina o ponto de acoplamento, em que se tem a mínima taxa de aquecimento para acoplamento, que nunca deve ser superada pela máxima taxa de aquecimento de carga, nem deve superar a taxa aquecimento suportável pelo motor.

As curvas dos ábacos que são mostradas a seguir são determinadas baseadas nas equações citadas acima e que dependem essencialmente, dos parâmetros da tabela 4.15. Nesta série de oito gráficos, cada um deles, contém duas curvas, uma para as **taxas de acoplamento** para potência mínima $N_p(J_c, J_m, B_m, B_c, \alpha, \omega, \eta, T_p)$, e outra curva para a **taxa de acoplamento** para aquecimento mínimo $N_a(J_c, J_m, B_m, B_c, \alpha, \omega, \eta, T_p)$. Cada um deles é construído baseado nos parâmetros fixos da coluna 4, e nas respectivas linhas do parâmetro básico para o qual se deseja, investiga o comportamento da taxa de acoplamento.

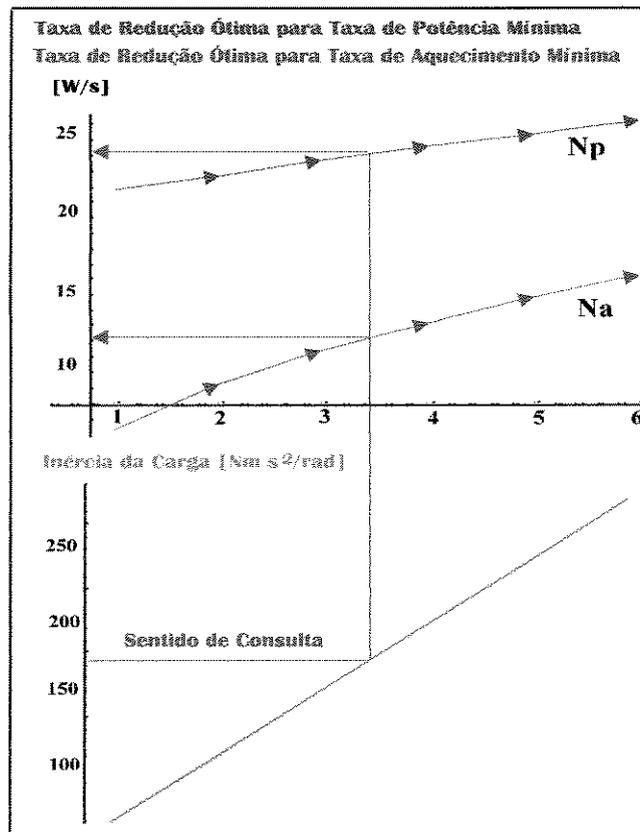


Figura 4.68: Taxas de acoplamento, em função da variação da Inércia da Carga.

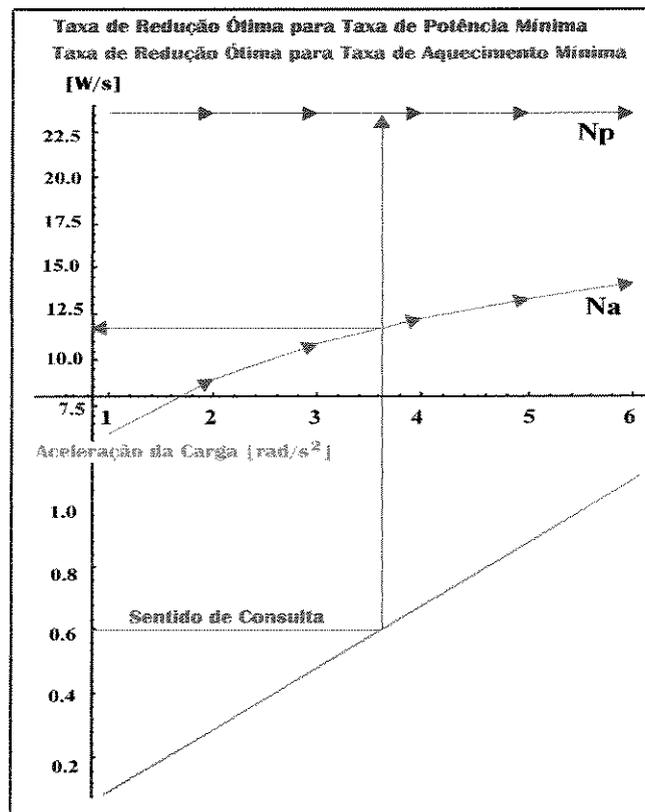


Figura 4.69: Taxas de acoplamento, em função da variação da aceleração da Carga.

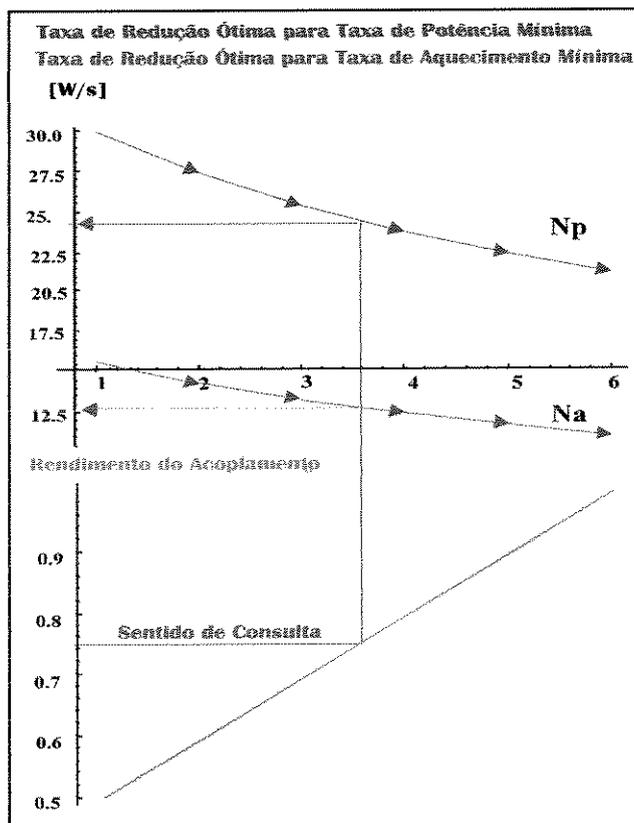


Figura 4.70: Taxas de acoplamento, em função da variação do rendimento do acoplamento.

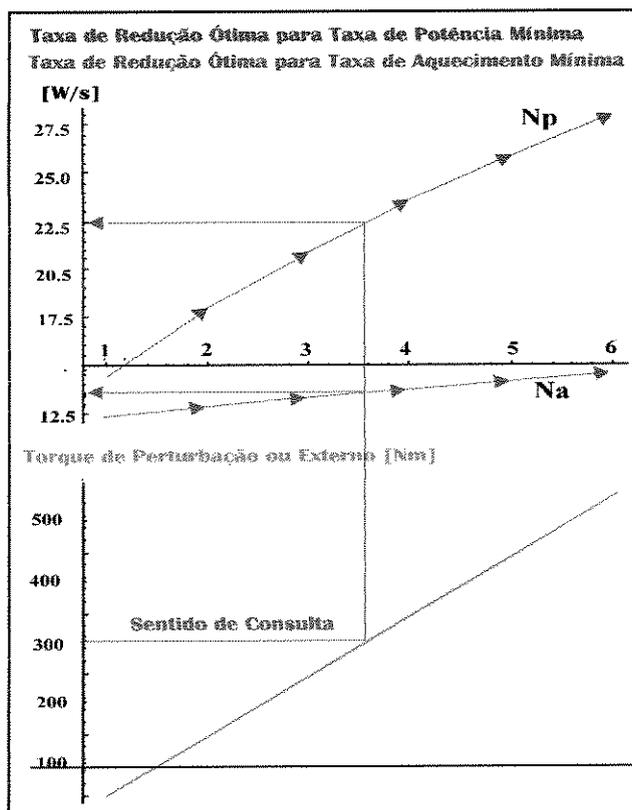


Figura 4.71: Taxas de acoplamento, em função da variação do torque de perturbação.

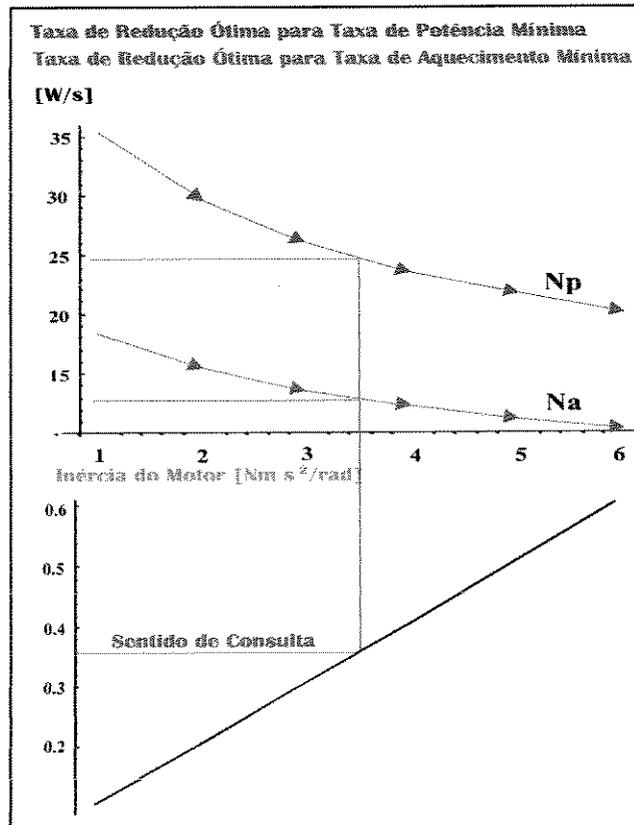


Figura 4.72: Taxas de acoplamento, em função da variação da inércia eixo do motor.

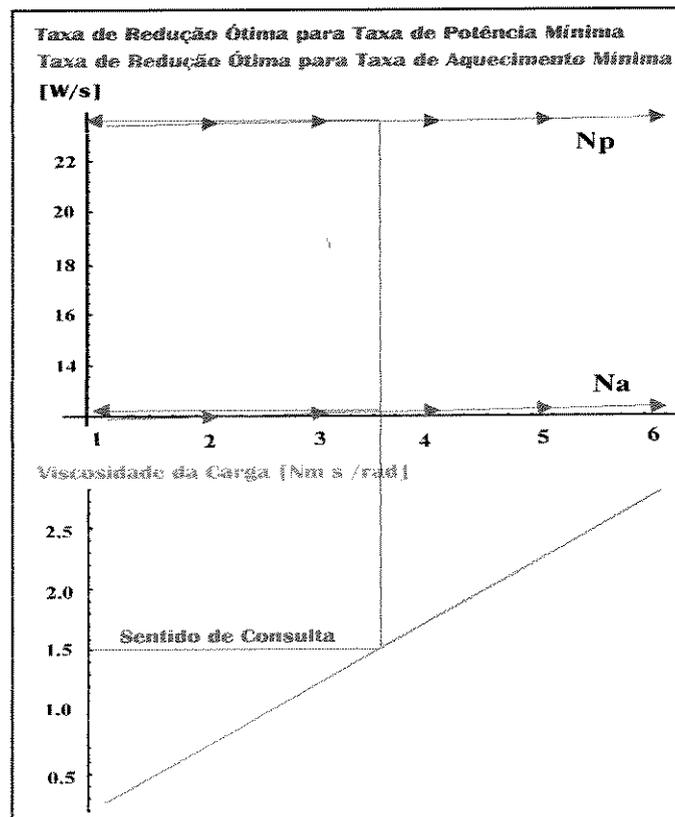


Figura 4.73: Taxas de acoplamento, em função da variação da viscosidade da carga.

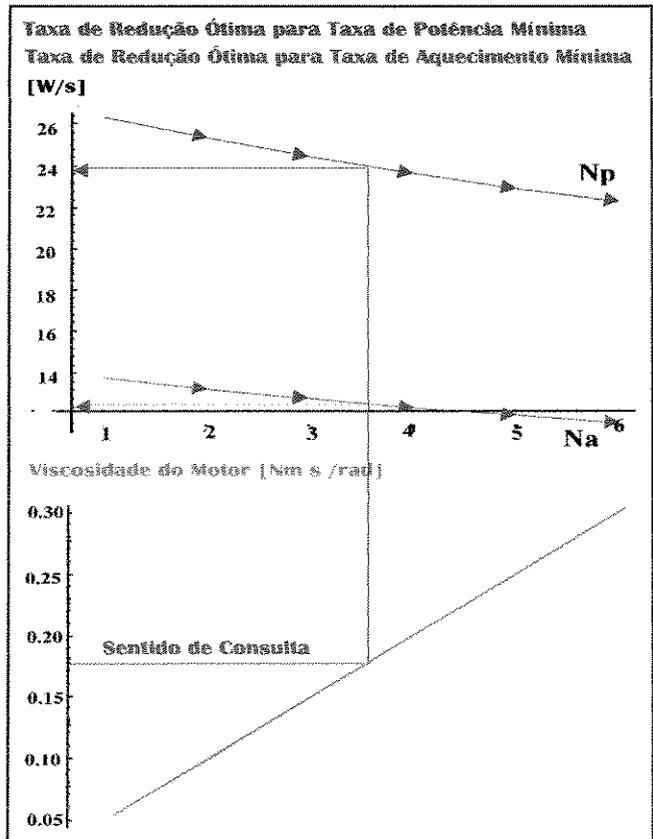


Figura 4.74: Taxas de acoplamento, em função da viscosidade do motor.

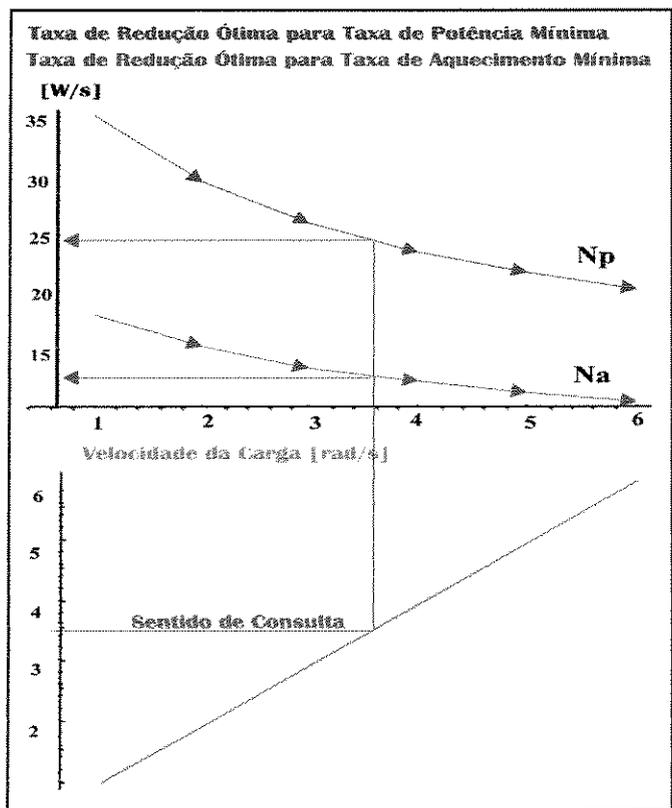


Figura 4.75: Taxas de acoplamento, em função da velocidade da carga.

Analisando-se as curvas dos ábacos das figuras 4.68 a 4.74, pode-se verificar que as taxas de acoplamento N_p , para mínima taxa de potência de acoplamento, e N_a para mínima taxa de aquecimento, aumenta proporcionalmente com os parâmetros da carga, inércia de carga figuras 4.68, aceleração de carga 4.69, perturbação de carga 4.71 e viscosidade de carga 4.73, e inversamente com os parâmetros do motor, como viscosidade do motor 4.74, inércia do motor 4.72 o rendimento do acoplamento, figuras 4.70, e finalmente para a velocidade da carga mostrada na figura 4.75 que neste caso particular contribui para as dissipações mecânicas internas que se situam no denominador da fórmula da taxa de redução, muito mais do que para o torque de carga que fica no numerador.

Ao mesmo tempo, pode-se constatar que se um determinado parâmetro básico contribui mais para o torque dissipador mecânico do motor do que para o toque de carga, menor será a taxa de acoplamento requerida, e quanto mais este parâmetro contribuir para o aumento do torque de carga do que para o torque mecânico do motor, maior será a taxa de redução requerida, porque a taxa de acoplamento é diretamente proporcional ao torque de carga e inversamente proporcional ao torque motor (veja as equações 3.75, 3.124, 3.162, 3.24 a 3.30, 3.43 a 3.48 e 3.151 a 3.156).

Assim, quanto maior for o rendimento do acoplamento, e os parâmetros mecânicos internos do motor, menor terá que ser a taxa de acoplamento que define a mínima taxa de potência e de aquecimento do acoplamento, e quanto mais significativa for a contribuição deste parâmetro para o torque de carga, maior será a taxa de redução exigida para que se tenha a menor taxa de potência e de aquecimento solicitada para o motor.

4.4.2 Graus de Acoplamento e de Aquecimento, $G(n)$ e $h(n)$,

Os graus de acoplamento e de aquecimento são também característicos dos casos de acionamento indireto (seção 3.4 do capítulo 3), e contribuem para a modificação das taxas de potência e de aquecimento de carga, quando há acoplamento ou redução.

Dependendo do motor escolhido, do tamanho da carga e da taxa de redução, o motor pode não ser capaz de suprir a potência de carga, ou pode se aquecer além da temperatura para qual ele está projetado para funcionar, sem se danificar, ou ter vida longa.

Pelas razões apresentadas acima, é importante se ter uma noção do comportamento destas funções, uma vez que elas determinam o domínio das taxas de redução, a qual deve ser determinada no final do processo de seleção de atuadores, e estar dentro de limites.

Neste caso também, as curvas dos ábacos das figura 4.76 a 4.83 que serão mostradas a seguir, também dependem essencialmente, dos parâmetros da tabela 4.15.

Nesta série de oito gráficos, percebe-se que cada um deles contém duas curvas, uma para o grau de acoplamento $G_n=f(J_c, J_m, B_m, B_c, \alpha, \omega, \eta, T_p)$, obtido através das 3.33, 3.51 e 3.156; e outra para o grau de aquecimento $h(n)=f(J_c, J_m, B_m, B_c, \alpha, \omega, \eta, T_p)$, obtido através das equações 3.84, 3.90, 3.95, 3.128 e 3.133 3.166, onde se pode verificar que cada uma daquelas curvas são construídas com base nos parâmetros fixos mostrado na lista 1, e na linha da tabela 4.15. correspondente ao respectivo parâmetro básico analisado no gráfico.

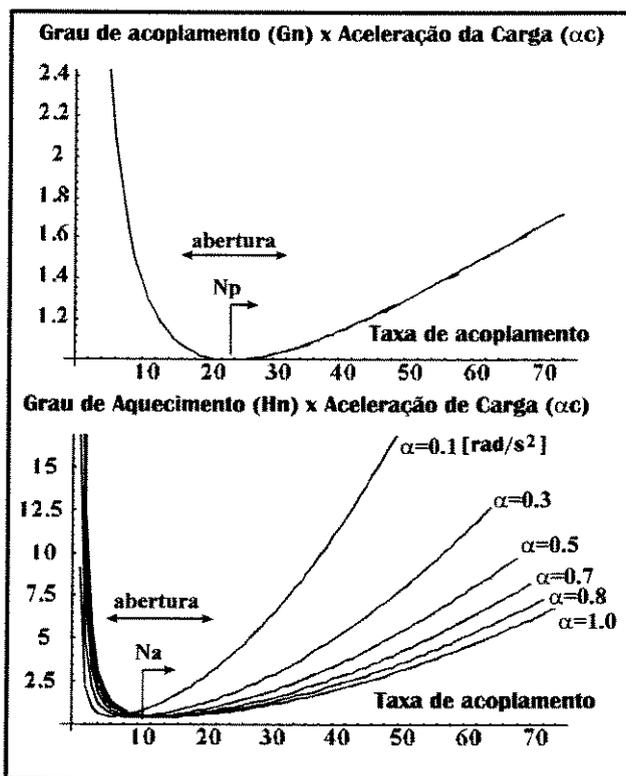


Figura 4.76: Comportamento dos graus de aquecimento de acoplamento, em função da taxa de acoplamento e da aceleração da carga para acionamento indireto.

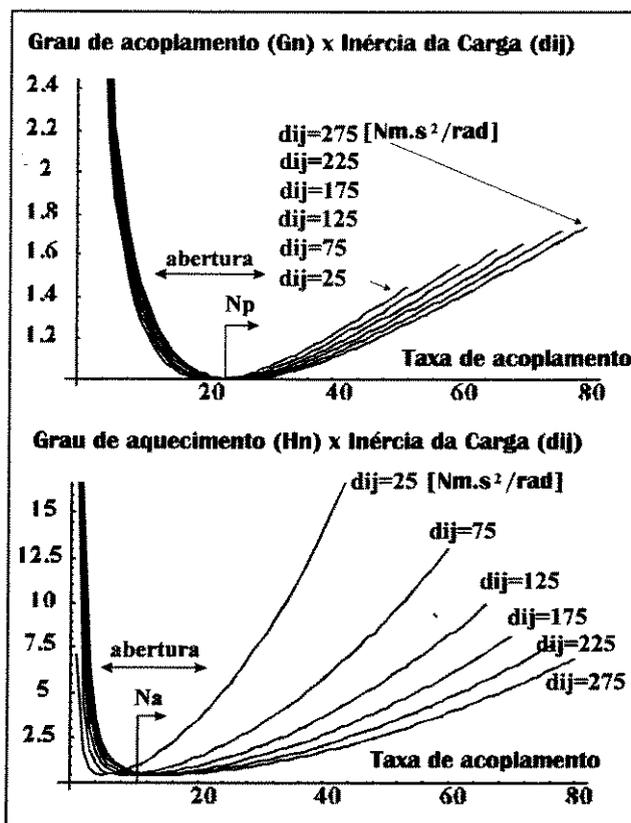


Figura 4.77: Comportamento dos graus de aquecimento de acoplamento, em função da taxa de acoplamento e da inércia da carga para acionamento indireto.

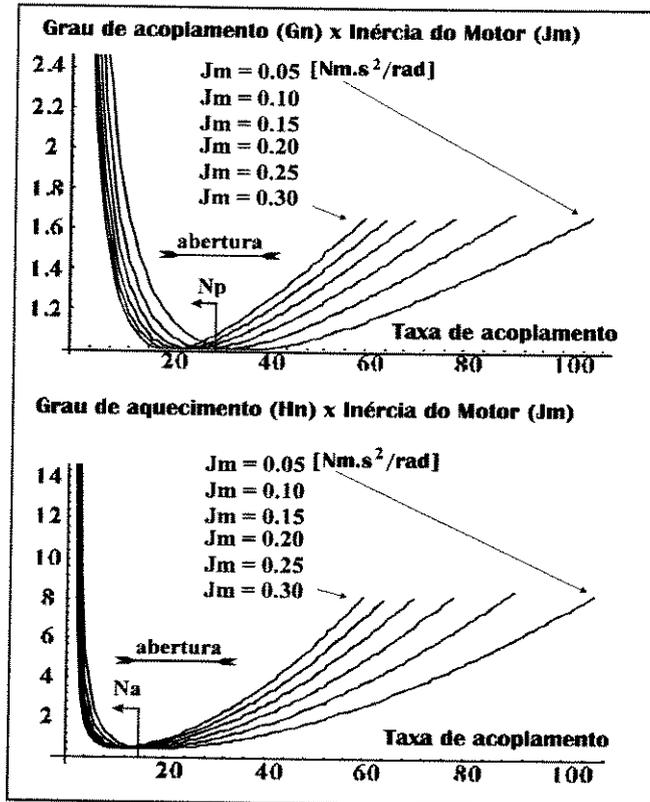


Figura 4.78: Comportamento dos graus de aquecimento de acoplamento, em função da taxa de acoplamento e da aceleração da carga para acionamento indireto.

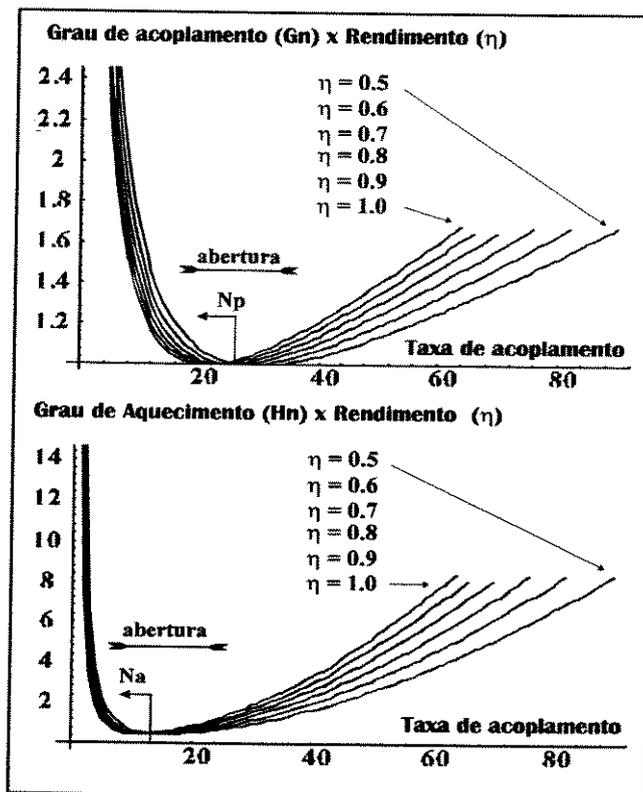


Figura 4.79: Comportamento dos graus de aquecimento de acoplamento, em função da taxa de acoplamento e do rendimento do acoplamento para acionamento indireto.

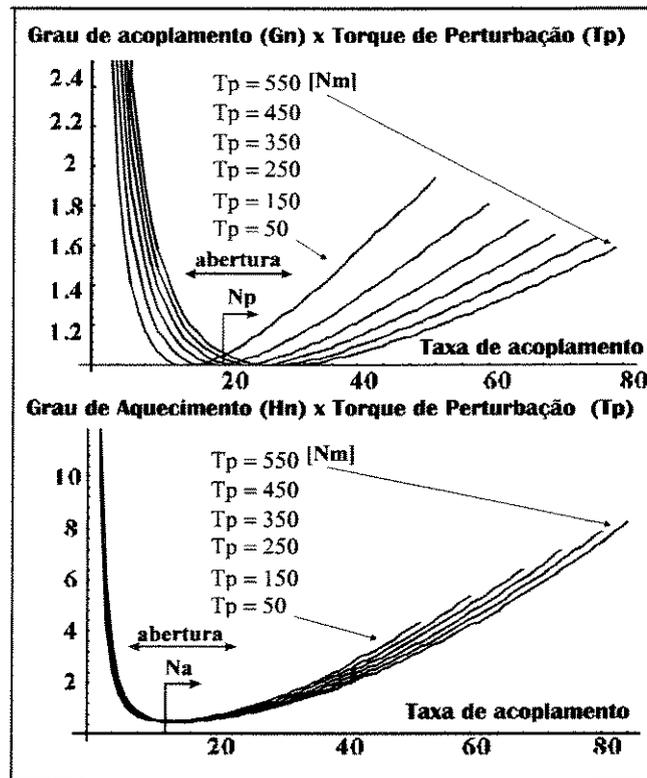


Figura 4.80: Comportamento dos graus de aquecimento de acoplamento, em função da taxa de acoplamento e do torque de perturbação da carga para acionamento indireto.

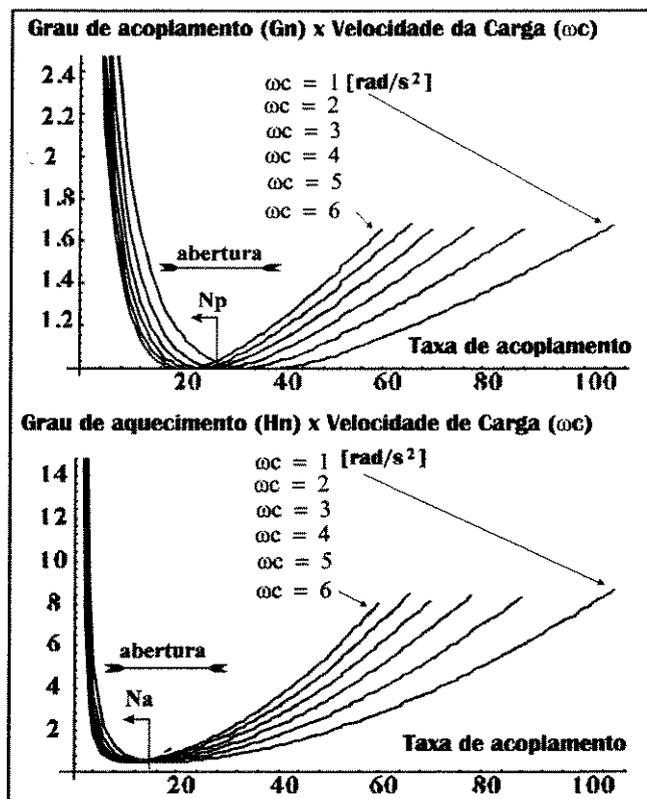


Figura 4.81: Comportamento dos graus de aquecimento e de acoplamento, em função da taxa de acoplamento e da Velocidade de carga para acionamento indireto.

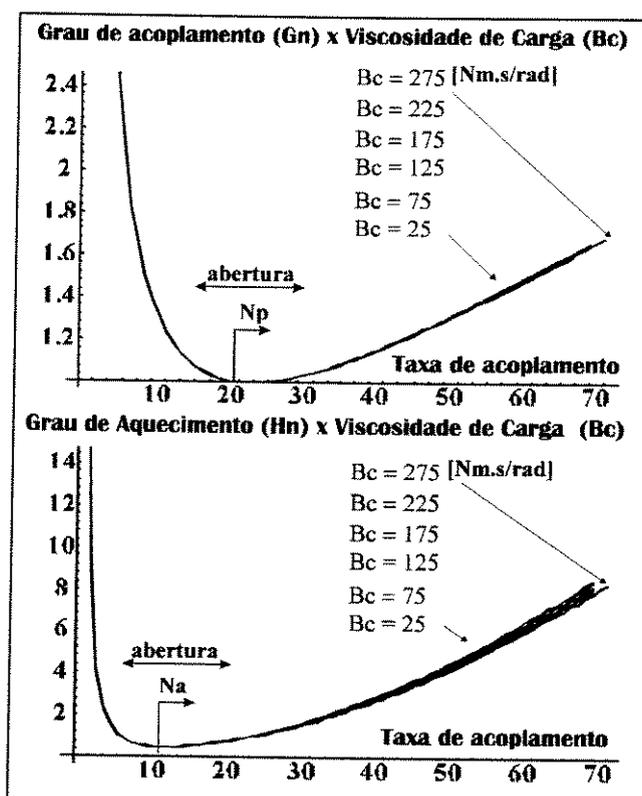


Figura 4.82: Comportamento dos graus de aquecimento e de acoplamento, em função da taxa de acoplamento e da Viscosidade de carga para acionamento indireto.

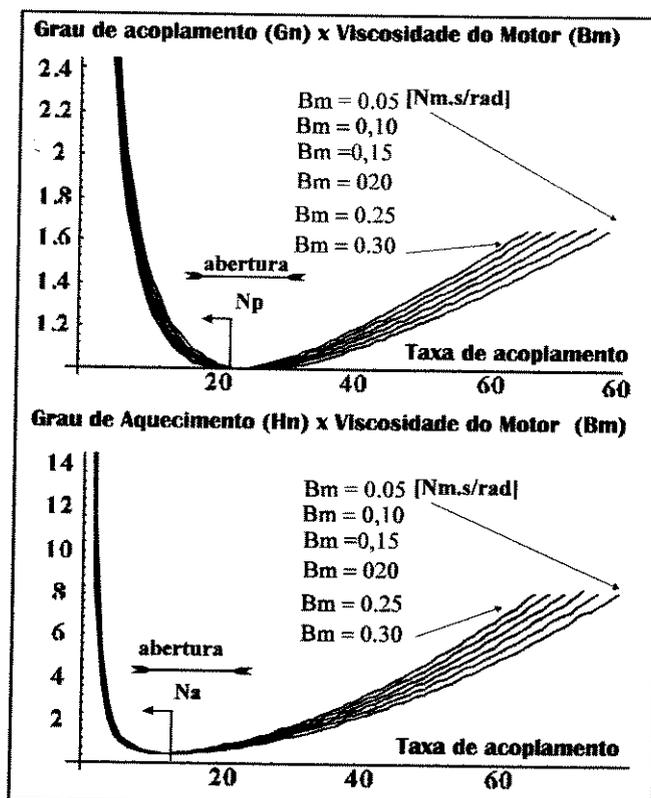


Figura 4.83: Comportamento dos graus de acoplamento e de acoplamento, em função da taxa de acoplamento e da viscosidade do motor para acionamento indireto.

Baseando-se nos gráficos e ábacos mostrados nas figuras 4.76 a 4.83, pode-se constatar que **umentando-se** os parâmetros de **carregamento** das juntas, ao **contrário** de quando se aumenta-se os parâmetros do **motor** e do **acoplamento**, as **concavidades das curvas** dos graus de acoplamento $G(n)$ e de aquecimento $h(n)$ **juntamente com taxas** de redução N_p e N_a que definem, respectivamente, as abscissas dos mínimos das curvas dos graus de acoplamento e de aquecimento, **umentam** simultaneamente.

Todas as curvas das figuras indicadas, migram para o lado direito, e as taxas N_p e N_a também, mas a linha que cresce para a direita, cresce muito mais. Este aumento de concavidade ocorre para os seguintes parâmetros básicos: viscosidade da carga figura 4.82, inércia da carga figura 4.77, aceleração da carga figura 4.76, e torque de perturbação (da carga, mais o resto das juntas superiores) figura 4.80.

A redução da **abertura** da concavidade das curvas ocorre com o aumento dos seguintes parâmetros básicos, a viscosidade do motor figura 4.83, inércia do motor figura 4.78, velocidade da carga 4.81, e rendimento figura 4.79. Isto influi no processo de seleção, porque age no sentido de aumentar o domínio da curva das taxas de aquecimento e de potências de acoplamento, que é a taxa da redução.

4.4.3 Taxas de Potência e de Aquecimento, da Carga \dot{P}_{ck} e \dot{A}_{ck} e do Acoplamento \dot{P}_{ac} e \dot{A}_{ac} .

Anteriormente foi mostrado que os parâmetros básicos influem nas taxas de redução, e nos graus de acoplamento e de aquecimento, pois estes determinam as taxas de potência e de aquecimento de acoplamento, e influem diretamente na determinação da taxa de redução dos acionamentos indiretos. Por outro lado, também será visto aqui o comportamento das taxas de potências e de aquecimento de carga, que devem ser parâmetros diretos para seleção de atuadores, diretos ou indiretos sem redução, e são taxas mínimas para o acionamento indireto.

4.4.3.1 Taxa de Potência \dot{P}_{ac} e Aquecimento \dot{A}_{ac} , em Função do Acoplamento para Acionamentos Reduzidos.

Analogamente aos demais parâmetros estudados até aqui, os parâmetros básicos usados no processo de análise do comportamento das taxas de potência \dot{P}_{ac} , ver equações 3.36, 3.52, 3.134, 3.160, e taxas de aquecimento para acoplamento em acionamento indireto, \dot{A}_{ac} , ver equações 3.99, 3.117, 3.135, 3.169, 3.170 e 3.172 do capítulo 3, são estudados e simulados a partir dos parâmetros definidos na tabela 4.15 e lista B.3 do anexo B.

Os resultados das simulações destes parâmetros usando-se as equações mencionadas, conduz às curvas gráficos e ábacos, definidos, nas figuras 4.84 a 4.91, respectivamente para os parâmetros, viscosidade da carga figura 4.90; momento de inércia da carga figura 4.85; torque de perturbação da carga figura 4.88; velocidade da carga figura 4.89; aceleração da carga figura 4.84; rendimento do acoplamento figura 4.87; viscosidade do rotor do motor 4.91; inércia do motor figura 4.86.

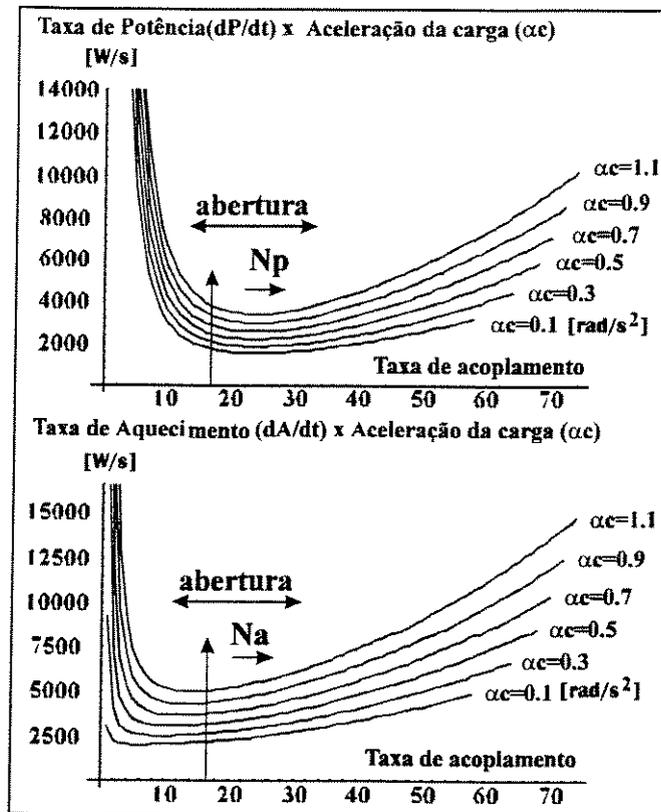


Figura 4.84: Comportamento das taxas de potência e de aquecimento do acoplamento, em função da taxa de acoplamento e da aceleração da carga para acionamento indireto.

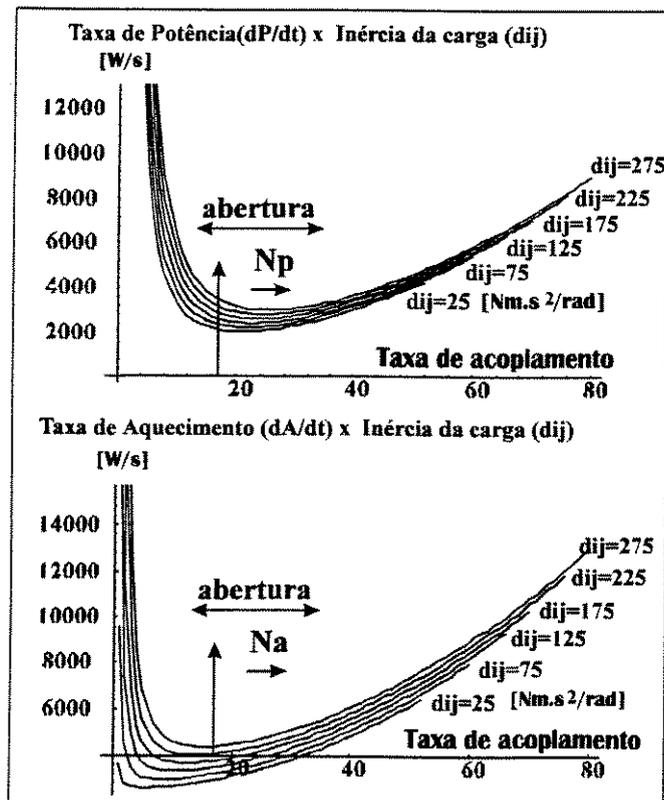


Figura 4.85: Comportamento das taxas de potência e de aquecimento do acoplamento, em função da taxa de acoplamento e da inércia da carga para acionamento indireto.

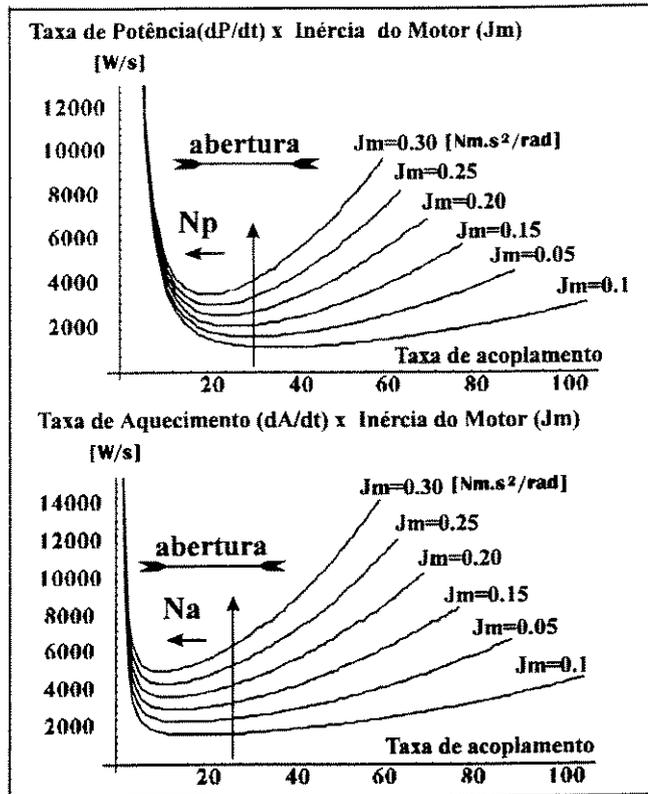


Figura 4.86: Comportamento das taxas de potência e de aquecimento do acoplamento, em função da taxa de acoplamento e inércia do motor para acionamento indireto.

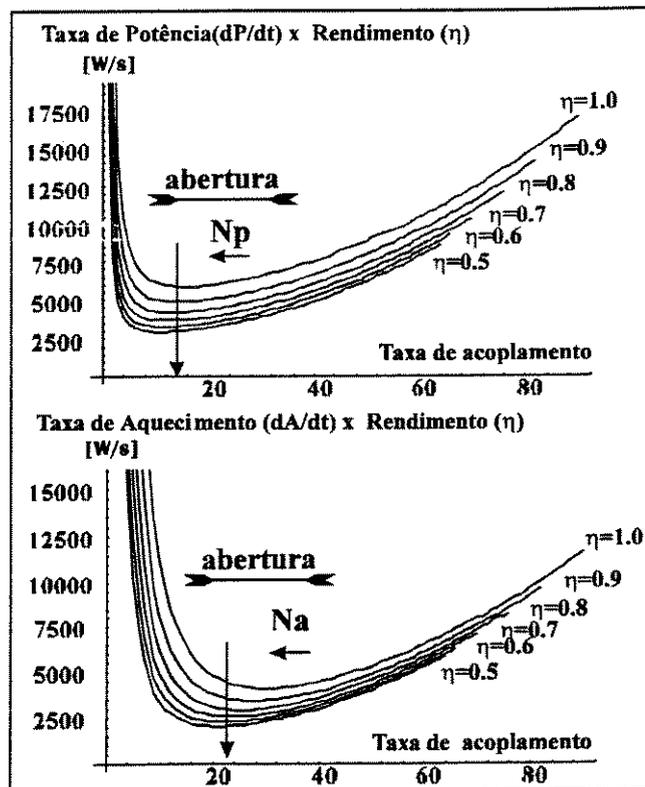


Figura 4.87: Comportamento das taxas de potência e de aquecimento do acoplamento, em função da taxa de acoplamento e do rendimento do acoplamento para acionamento indireto.

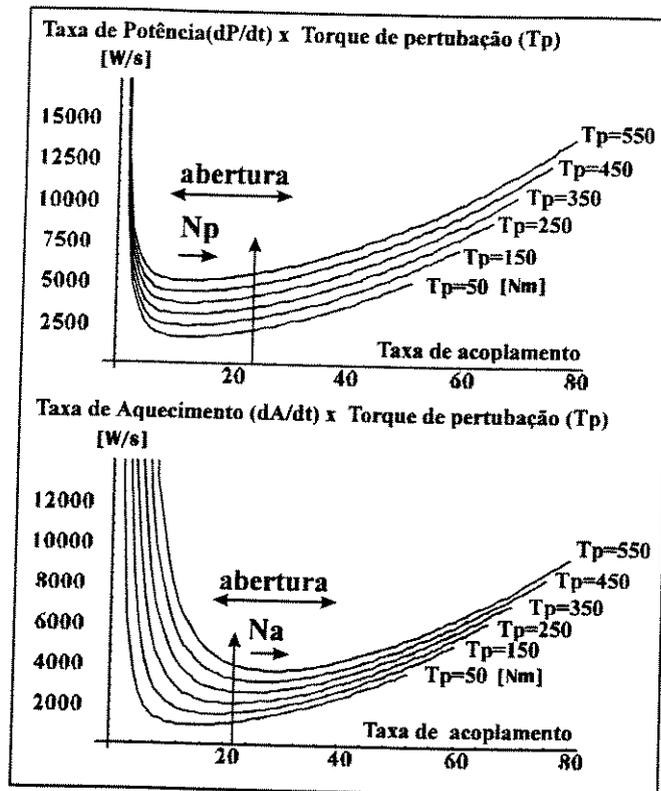


Figura 4.88: Comportamento das taxas de potência e de aquecimento do acoplamento, em função da taxa de acoplamento e do torque de perturbação para acionamento indireto

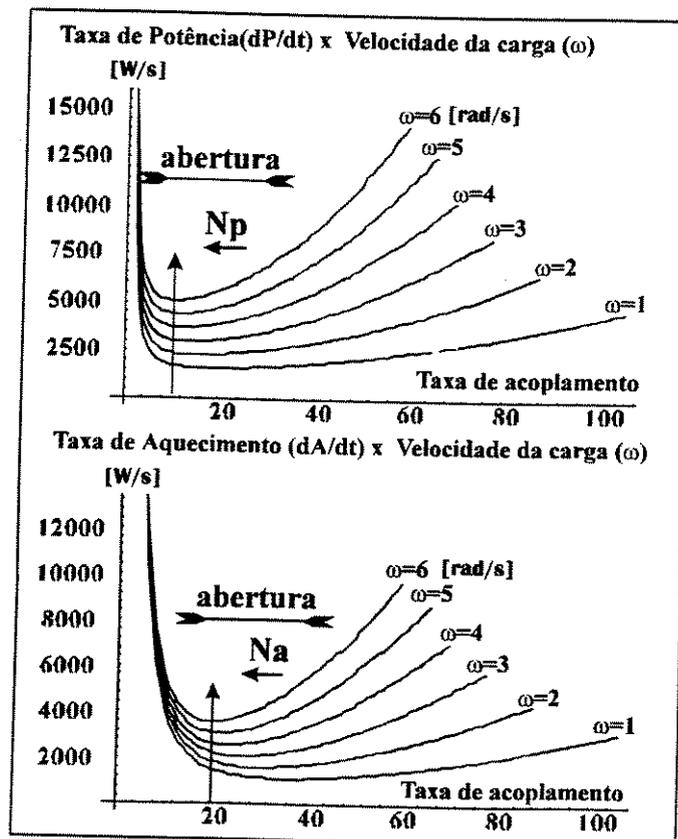


Figura 4.89: Comportamento das taxas de potência e de aquecimento do acoplamento, em função da taxa de acoplamento e da velocidade da carga para acionamento indireto

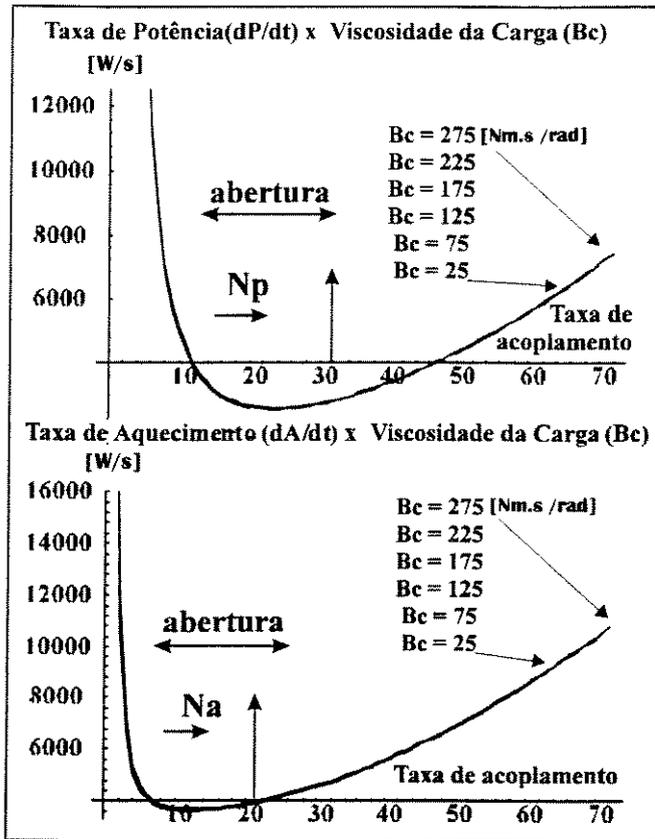


Figura 4.90: Comportamento das taxas de potência e de aquecimento do acoplamento, em função da taxa de acoplamento e da viscosidade da carga para acionamento indireto

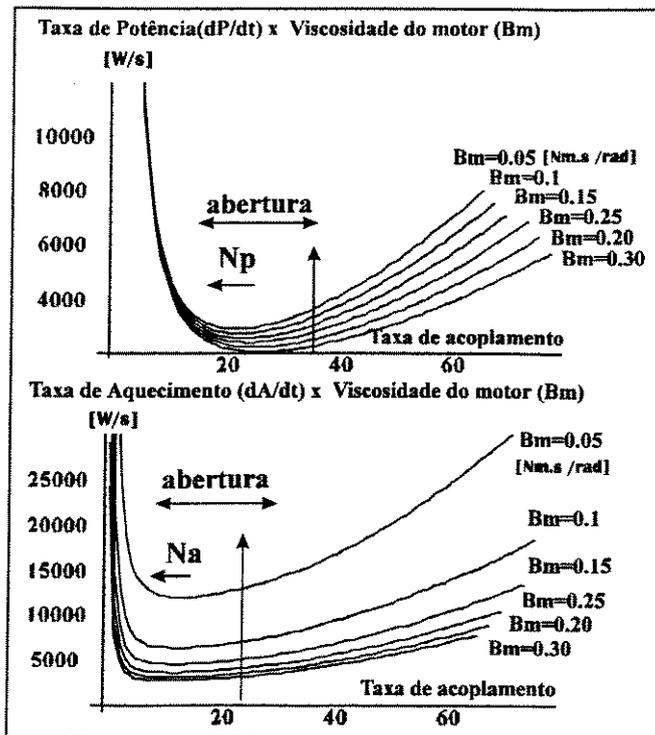


Figura 4.91: Comportamento das taxas de potência e de aquecimento do acoplamento, em função da taxa de acoplamento e da viscosidade do motor para acionamento indireto.

Uma vez concluídos os gráficos das taxas de potências e de aquecimento para acoplamento, pode-se dizer que o comportamento destas taxas inclui o comportamento das taxas de redução e os fatores de acoplamento e de aquecimento determinados anteriormente.

Entretanto, diferentemente dos demais experimentos e resultados obtidos, um novo comportamento aparece aqui em função dos parâmetros básicos. O **aumento da amplitude da taxa de aquecimento mínima para o acoplamento**, $\dot{A}_r = [k_1 h(Na) \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_c + k_2 \overline{T_{mc} T_c}] / \eta$, onde $h(Na) = 0.5$, dependendo da média do produto dos torques eficazes. A **abertura da concavidade da curva** $\dot{A}(N) = k_1 [h(N) - 0.5] \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_c / \eta$ **diminui** com o aumento do produto dos torques eficazes. Também, por outro lado, a taxa de **potência de acoplamento de off-set** $\dot{P}_r = \max[T_{mc} T_c] G(Np) / \eta$, onde $G(Np) = 1$, **crece** com aumento do valor máximo do produto de torques, e finalmente, a **abertura na taxa de potência de acoplamento** $\dot{P}(N) = [k_3 (G(N) - 1) \max[T_{mc} T_c]] / \eta$ **diminui** com o aumento do valor máximo do produto de torques.

Observando-se estas considerações, verifica-se que os parâmetros básicos contribuem de forma diferente em relação aos casos anteriores. A função estudada aqui, depende do produto do **toque virtual do motor pelo torque de carga**, enquanto nos demais casos, dependiam da raiz quadrada da razão entre estes dois parâmetros.

Pelas razões citadas e descritas anteriormente, os parâmetros básicos do motor que agiam contra os parâmetros básicos da carga, (ou seja, a contribuição do torque virtual do motor que era inversa à do torque da carga), agora passaram a agir ambas no mesmo sentido.

O único fator que permanece agindo no sentido inverso, é o rendimento do acoplamento, por isto ele é o único parâmetro que ao crescer contribui para a redução dos valores mínimos das taxas de potência e de aquecimento de acoplamento. Entretanto, devido a superposição destas condições com as modificações causadas nos fatores de aquecimento de potência, as aberturas das concavidades das curvas depende da predominância da ação direta e indireta (através dos fatores de potência e de aquecimento) dos parâmetros básicos no cálculo das taxas.

4.4.3.2 Taxa de Potência e Aquecimento de Carga \dot{P}_{ck} e \dot{A}_{ck}

As taxas de potência e de aquecimento de carga, **no acionamento indireto reduzido** são aquelas requerida independente do acoplamento ou para as mínimas taxas de acoplamento. Elas seriam as mínimas taxas de potência, ver 3.37 a 3.40, 3.53 a 3.56, 3.99, 3.100 e 3.160, taxas e de aquecimento vide equações 3.100, 3.121, 3.136, 3.171 e 3.173.

As diferenças da definição destas taxas **para os acionamentos direto e indireto não reduzido**, é que neste caso as taxas de potências de carga são dadas pelas equações 3.197 a 3.200 e 3.216 e 3.217, e as taxas de aquecimento de carga são regidas pelas equações 3.208 e 3.209 e 3.220 e 3.221, Da mesma forma que nas demais seções deste capítulo, os gráficos produzidos aqui, tem como informação os parâmetros da tabela 4.15, e lista B.3 do anexo B. Os resultados destes testes estão mostrados nas figuras 4.92, a 4.99.

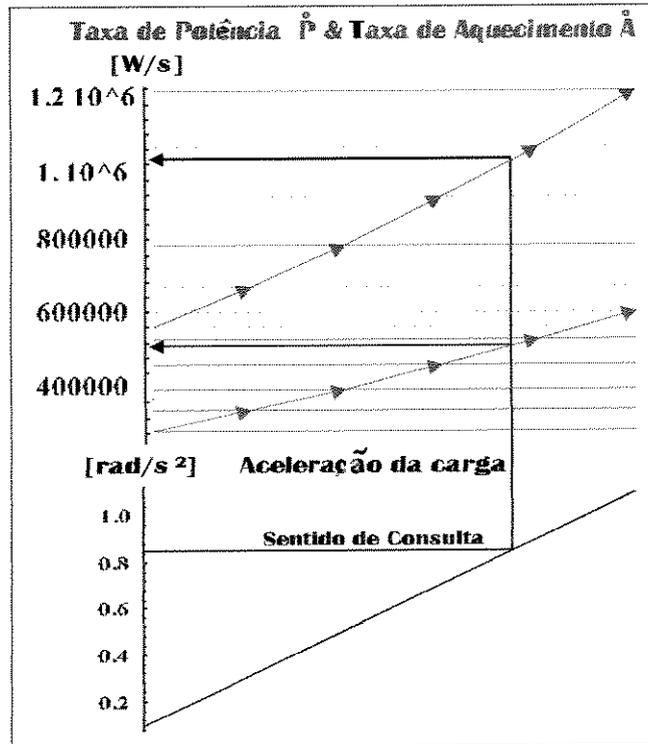


Figura 4.92: Comportamento das taxas de potência e de aquecimento da carga, em função da taxa de acoplamento e da aceleração da carga para acionamento direto.

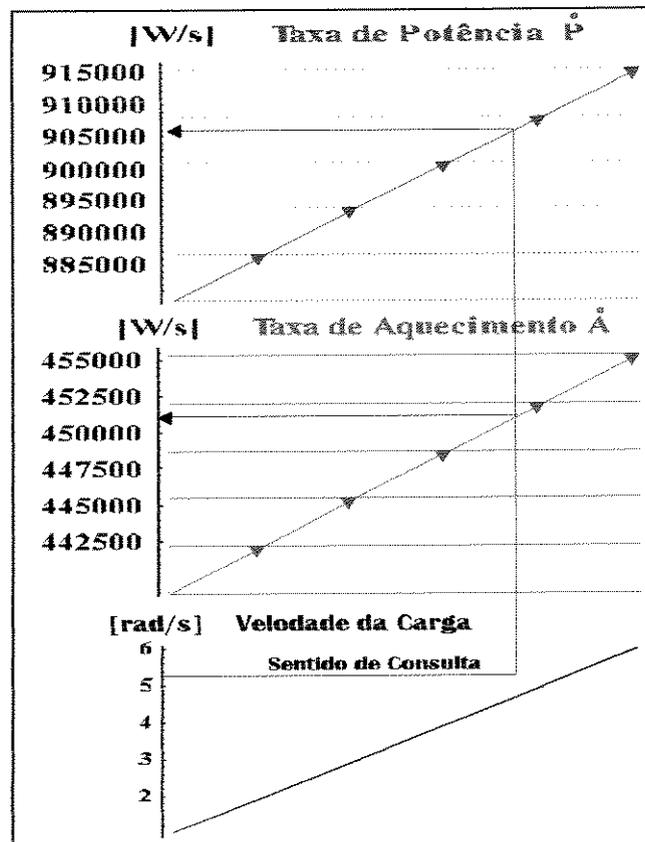


Figura 4.93: Comportamento das taxas de potência e de aquecimento da carga, em função da taxa de acoplamento e da velocidade da carga, para acionamento direto.

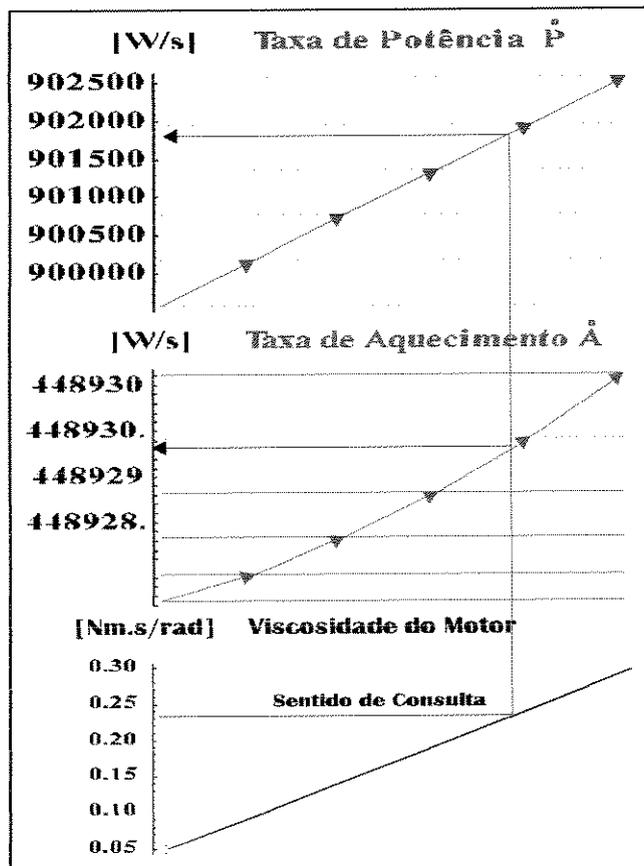


Figura 4.94: Comportamento das taxas de potência e de aquecimento da carga, em função da taxa de acoplamento e da viscosidade do motor para acionamento direto.

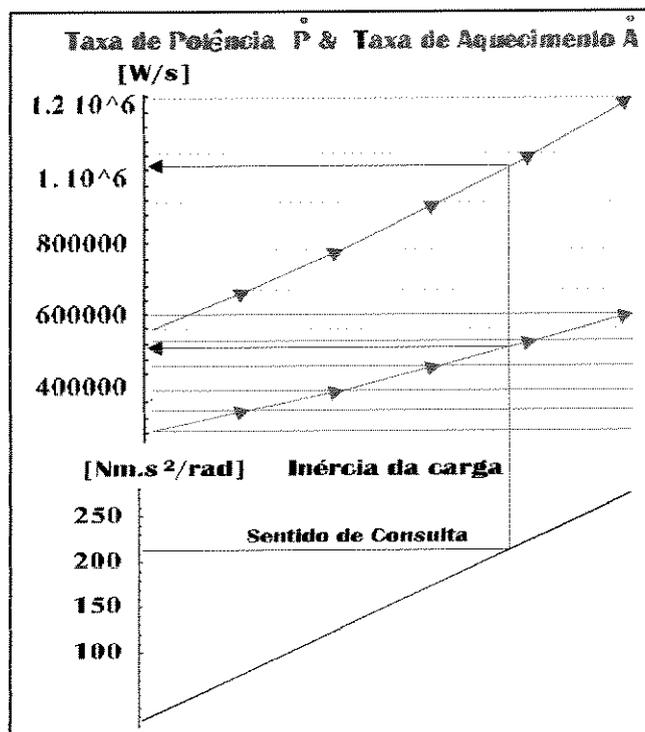


Figura 4.95: Comportamento das taxas de potência e de aquecimento da carga, em função da taxa de acoplamento e da inércia da carga para acionamento direto.

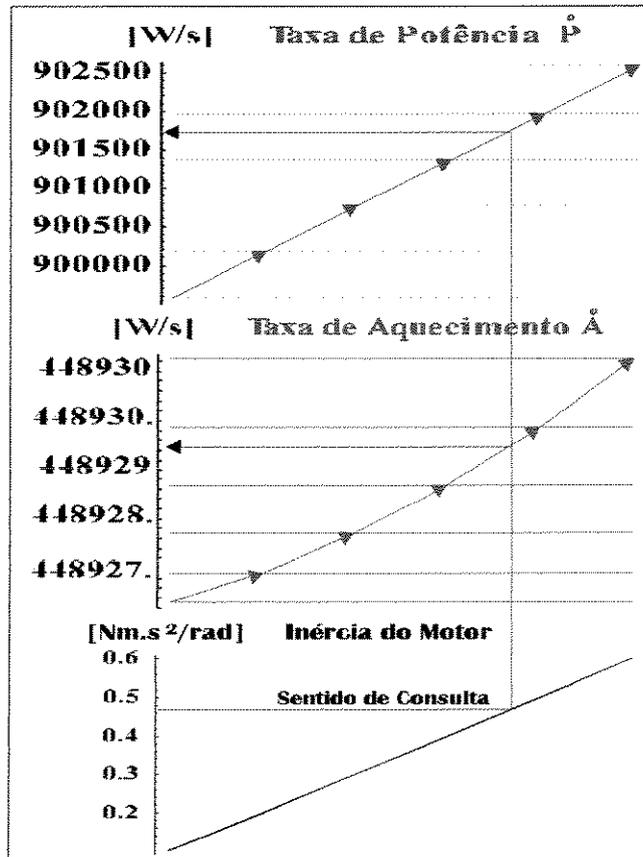


Figura 4.96: Comportamento das taxas de potência e de aquecimento da carga, em função da taxa de acoplamento e da inércia do motor para acionamento direto

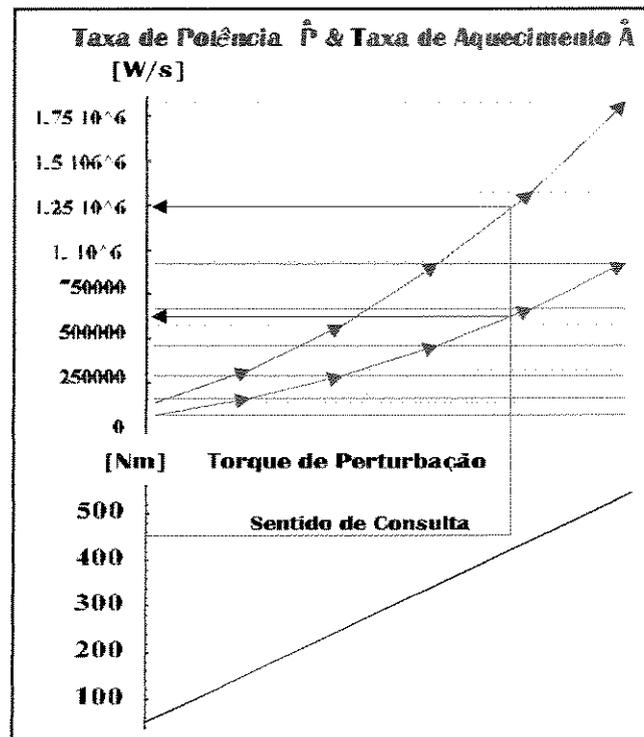


Figura 4.97: Comportamento das taxas de potência e de aquecimento da carga, em função da taxa de acoplamento e da torque de perturbação da carga para acionamento direto

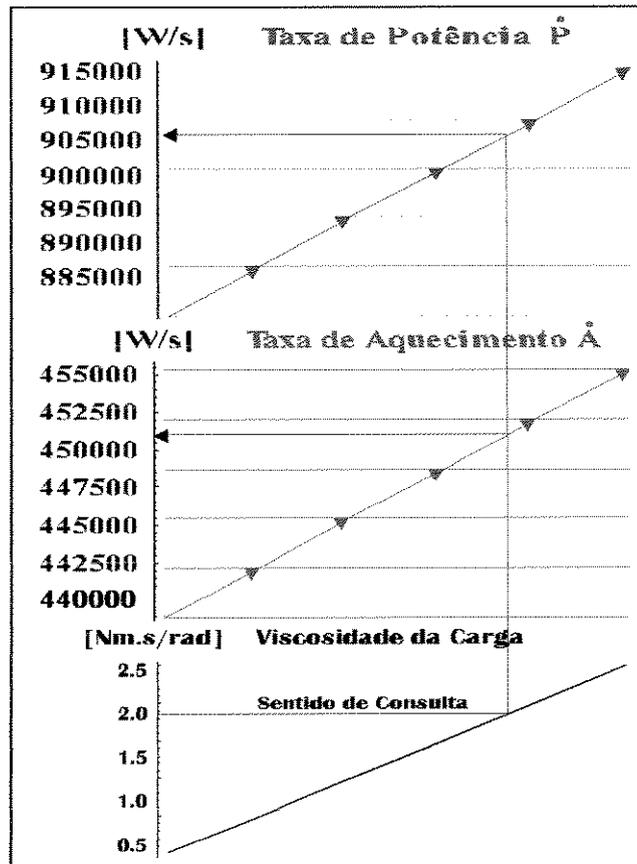


Figura 4.98: Comportamento das taxas de potência e de aquecimento da carga, em função da taxa de acoplamento e da viscosidade da carga para acionamento direto.

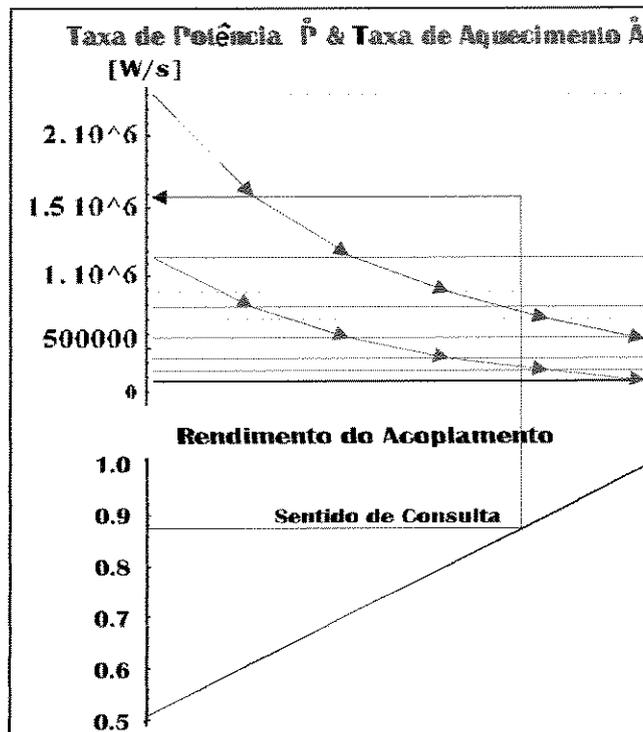


Figura 4.99: Comportamento das taxas de potência e de aquecimento da carga, em função da taxa de acoplamento e rendimento do acoplamento para acionamento direto

As taxas de aquecimento, e de potência de carga, ao contrário das taxas de aquecimento e de potência de acoplamento, não dependem das taxas de redução, e nem dos fatores de acoplamento e de aquecimento. No capítulo 4 as taxas de potências de cargas assumem a forma $\dot{P}_r = \max[T_{mc}^2 + [T_c / \eta]^2]$, e as taxas de aquecimento de carga assumem a forma $\dot{A}_r = [k_4 \tilde{T}_{mc} + k_5 [\tilde{T}_c / \eta]^2 + k_2 \overline{T}_{mc} \overline{T}_c / \eta]$. Por esta razão, pode se ver que o crescimento de todos os parâmetros básicos dos motores e das cargas, contribuem para o crescimento destas taxas. Isto é mostrado nos ábacos e gráficos das figuras 4.92 a 4.98.

O mesmo não ocorre para o crescimento do rendimento da transmissão quando ela existe, pois se ele aumenta, as taxas de potência de aquecimento de carga decrescem como mostra as expressões e figura 4.99, porque quanto maior for o rendimento, melhor o desempenho da transmissão, e conseqüentemente menor as taxas requeridas do motor.

4.4.2 Taxas de Potência e de Aquecimento do Motor, \dot{P}_{cat} e \dot{A}_{cat}

As taxas de aquecimento \dot{A}_{cat} , e as taxas de potência \dot{P}_{cat} , dos motores, (veja respectivamente as equação 3.100 ou 4.1 e 4.2) medem respectivamente a capacidade máxima que este motor tem de injetar potência na carga, e a sua máxima produção de calor que ele pode dissipar, em operação contínua nas condições ambientais, sem sofrer danos internos.

Os parâmetros básicos usados para estudo do comportamento destas taxas se encontram na tabela 4.16, sendo eles a máxima temperatura ambiente, temperatura máxima de operação contínua do motor, constante de torque, resistência térmica, resistência elétrica, corrente de pico, momento de inércia, todos com exceção da temperatura ambiente máxima, e geralmente são encontrados nos catálogos ou podem ser calculados através dos dados retirados deles, como mostram tabelas 4.17 a 4.19, que ilustram os parâmetros típicos de catálogos reais [DIRET DRIVE], [DC MOTOR, 73] e [MOTION CONTROL].

A tabela 4.16, mostra algumas ocorrências dos parâmetros básicos de seleção de atuadores, que se desenvolvem em ordem crescente conforme encontrados nos catálogos, eles nem sempre crescem linearmente, e serão utilizadas para mostrar como se comportam as taxas de potência de aquecimento do motor com o crescimento destes parâmetros. A lista 4.2 contém os mesmos valores da coluna indicada com o número 4, na tabela 4.15, e que são fixados sempre que se ensaia os parâmetros de uma das linhas da tabela, e o resultado do ensaio de cada linha produz as curvas e ábacos de cada uma das oito figuras que se seguem a partir da figura 4.101.

Antes de mostrar os resultados, será comentado também sobre um parâmetro especial dos motores que influi na taxa de aquecimento, a resistência térmica do motor. A taxa de potência de aquecimento, como mostra a equação 4.1, diminui como aumento da resistência térmica, isso porque quanto menor este parâmetro, maior é a rapidez com que o motor escoar o calor produzido na armadura, aumentando a faixa de utilização do mesmo. Uma forma interessante de efetuar a queda na resistência térmica é implementando um sistema de resfriamento no motor. A figura 4.100, mostra um ábaco típico semelhante àqueles mostrados em [DC MOTOR, 89], que permitem determinar a resistência térmica de um motor, através da vazão de um sistema de resfriamento a água de um motor de corrente contínua.

Fatores de conversões

1 RPM = 6.28318512 rad /min = 0.104719752 rad /s 1K = 1000

1 oz = 0.278013851 N

1 in = 0.0254 m

1 oz -in = 0,0070615518154 Nm

Dados de Desempenho do Motor - MAGNETIC TECHNOLOGY - cod. 9375-640

Parâmetros		tol-1	tol- 2	tol-3	tol-4	tol-5	Unid. 1
Torque de Pico	Tp	14400					oz-in
Potência no - Tp	P	1132					watts=W
Velocidade s/ carga	ω	11.3	11,666667	11,127660	10,847458	10,918919	rad/s
Taxa de Temperat.	dθ	0.8					watt/°C
Temperatura	θ	155					°C
Tot. BreakwayTorq.	τf	330					oz-in
Momento de Inércia	J	10.3					$\frac{oz.in}{s^2}$
Peso	m	720					oz
Fator de Amort.	B	1274					$\frac{oz.in}{rad.s}$
Const. Temp. Elétr.	τe	0.13					s
Const. Temp. Mec.	τM	0.008					s
Constante do motor	Km	428					$\frac{oz.in}{\sqrt{W}}$
Acel. máxima	ap	1400					rad / s ²
Taxa Potênc. Máx.	dP	20M					$\frac{oz.in}{s^2}$
Resistência	Ω	0.95	1.5	2.4	3.7	5.9	Ω
Tensão no Tp	V	32.8	42	52.3	64	80.8	V
Corrente no Tp	A	34.5	28	21.8	14.3	13.7	A
Sensibil. de Torque	Kt	417	515	662	834	1054	$\frac{oz.in}{Amper}$
K f.c.e.m.	Kf	2.9	3.6	4.7	5.9	4.4	$\frac{V}{rad.S}$
Indutância	L	13	19	32	51	81	mH
Potência no - Tp	P	1130	1176	1141	1107	1107	watts=W
Torque de Pico	Tp	14386	14420	14431	14428	14713	oz-in
Taxa de Aquecim.	dA	7700756	7438889	7682270	7908885	7921621	$\frac{Watt}{s}$
Taxa de Pot. Máx.	dP	20092912	20188000	20218812	19653979	20988175	$\frac{Watt}{s}$

Tabela 4.17: Parâmetros característicos de motor MAGNETIC TECHNOLOGY™ 9375-640, retirados de catálogo ou calculados baseado nele.

$$dA = \dot{A}_m = \frac{(\theta_{max} - \theta_{amb})K_T^2}{R_\theta J_m R}, \quad (4.1)$$

$$dP = \dot{P}_m = \frac{T_p^2}{J_m} = \frac{RI^2}{J_m}, \quad P = RI^2, \quad T = KI \quad \omega = V/ke \quad (4.2)$$

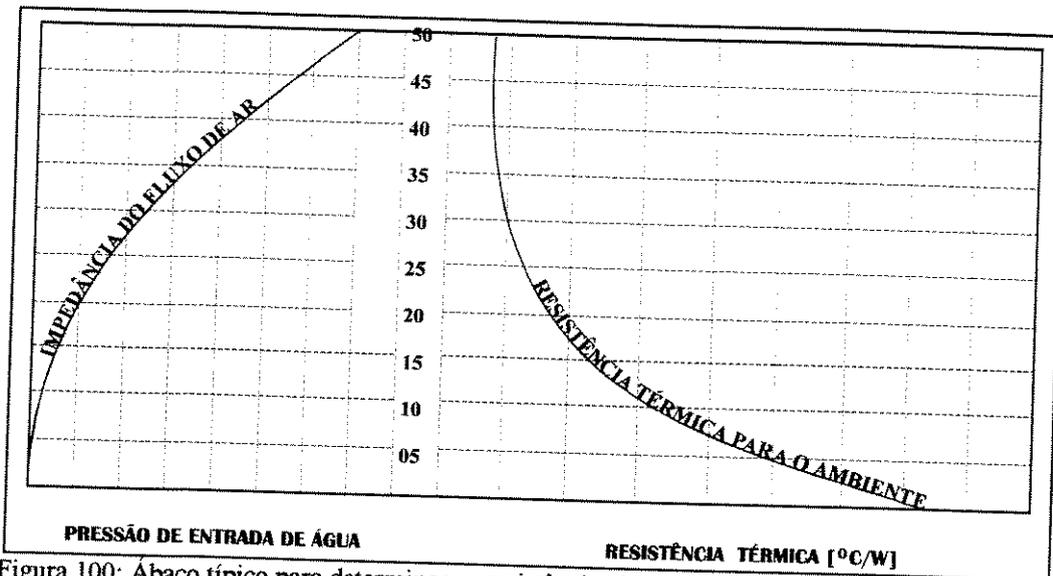


Figura 100: Ábaco típico para determinar a resistência térmica de resfriamento de um motor DC

Parâmetros		tol-1	tol-2	tol-3	tol-4	tol-6	tol-5	Unid. 1
Torque de Pico	T_p	4800						oz-in
Potência no - T_p	P	611						watts=W
Velocidade s/ carga	ω	18,97638	19,6	18,57143	18,55372	18,29582	18,16327	rad/s
Taxa de Temperat.	$d\theta$	0.8						watt/°C
Temperatura	θ	155						°C
Tot. Beakway Torq.	τ_f	68						oz-in
Momento de Inércia	J	1.53						$\frac{oz.in}{s^2}$
Peso	m	720						oz
Fator de Amort.	B	1274						$\frac{oz.in}{rad.s}$
Const. Temp. Elétr.	τ_e	0.002						s
Const. Temp. Mec.	τ_M	0.005						s
Constante do motor	K_m	194						$\frac{oz.in}{\sqrt{W}}$
Acel. máxima	a_p	3100						$\frac{rad}{s^2}$
Taxa Potênc. Máx.	dP	15M						$\frac{oz.in}{s^2}$
Resistência	Ω	0.9	1.3	2.1	3.2	5.2	8.2	Ω
Tensão no T_p	V	24.1	29.4	36.4	44.9	56.6	71.3	V
Corrente no T_p	A	26.8	22.6	14.3	14.0	10.9	8.7	A
Sensibil. de Torque	K_t	179	212	277	342	440	554	$\frac{oz.in}{Amper}$
K f.c.e.m.	K_f	1.27	1.5	1.96	2.42	3.11	3.92	$\frac{rad.S}{V}$
Indutância	L	1.7	2.3	4.0	6.1	10	16	mH
Potência no - T_p	P	646	663	629	627	618	620	watts=W
Torque de Pico	T_p	4797	4791	4792	4788	4796	4820	oz-in
Taxa de Aquecim.	dA	3781163	3671895	3880629	3882077	3954248	3975279	$\frac{Watt}{s}$
Taxa de Pot. Máx.	dP	15040005	15002405	15008669	14983623	15033735	15184575	$\frac{Watt}{s}$

Tabela 4.18: Parâmetros característicos de motor MAGNETIC TECHNOLOGY™ 7200-180, retirados de catálogo ou calculados baseado nele

Parâmetros		tol-1	tol- 2	tol-3	tol-4	tol-5	Unid. 1
Torque de Pico	Tp						oz-in
Potência no - Tp	P						watts=W
Velocidade s/ carga	ω						rad/s
Taxa de Temperat.	R θ	2.8					watt/°C
Temperatura	θ	155					°C
Tot. Beakway Torq.	τ_f	5					oz-in
Momento de Inércia	J	0.03					$\frac{oz.in}{s^2}$
Peso	m						OZ
Fator de Amort.	B	0.0068					$\frac{oz.in}{KRPM}$
Const. Temp. Elétr.	τ_e	0.0029					s
Const. Temp. Mec.	τ_M						s
Constante do motor	Km						$\frac{oz.in}{\sqrt{W}}$
Acel. máxima	ap						rad / s ²
Taxa Potênc. Máx.	dP						$\frac{oz.in}{s^2}$
Resistência	Ω	0.44	1.28	3.0	4.1	11.42	Ω
Tensão no Tp	V						V
Corrente no Tp	I	54.2	26	15.8	10.7	8.1	A
Sensibil. de Torque	Kt	13.2	24.6	44.2	66.1	88.5	$\frac{oz.in}{Amper}$
K f.c.e.m.	Kf	9.76	20.4	32.7	49	65.5	$\frac{V}{KRPM}$
Indutância	L	0.78	3.4	8.7	19.5	34.8	mH
Potência no - Tp	P	1293	975	749	812	735	watts=W
Torque de Pico	Tp	715	714.6	698	704.3	717	oz-in
Taxa de Aquecim.	dA	612857	921026	1007830	952376	1061413	$\frac{Watt}{s}$
Taxa de Pot. Máx.	dP	17040833	17164992	16240133	16675776	18007500	$\frac{Watt}{s}$

Tabela 4.19: Parâmetros característicos de motor DC MOTOR / E-660, retirados de catálogo ou calculados.

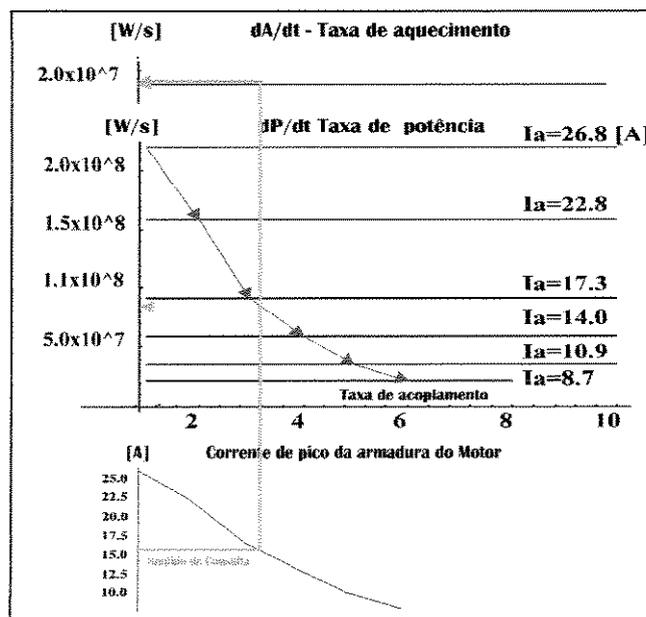


Figura 4.101: Taxas de potência e de aquecimento do motor, em função da corrente de pico da armadura I_a .

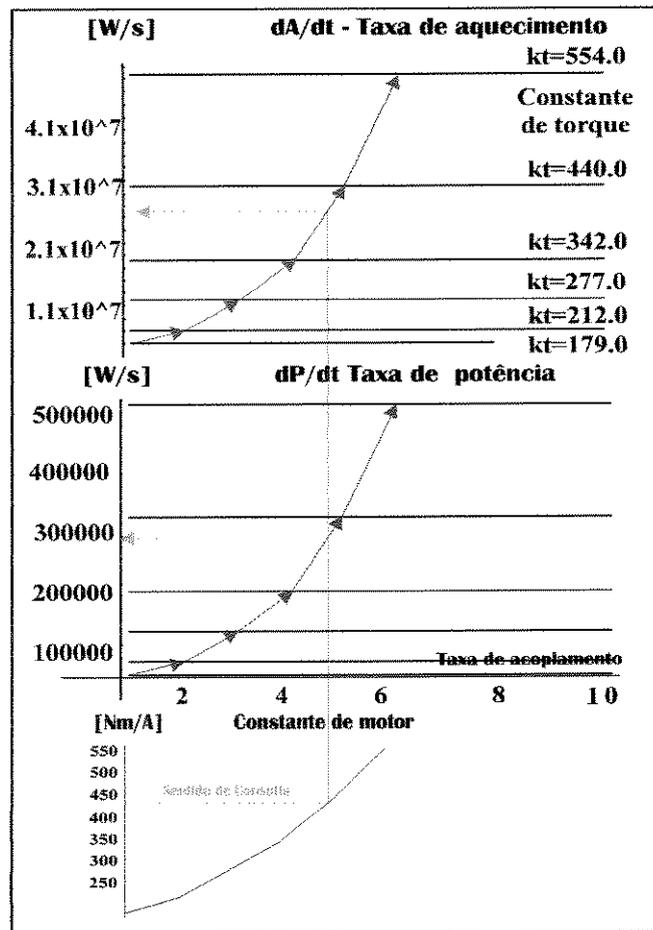


Figura 4.102: Taxas de potência e de aquecimento do motor, em função da constante de torque kt .

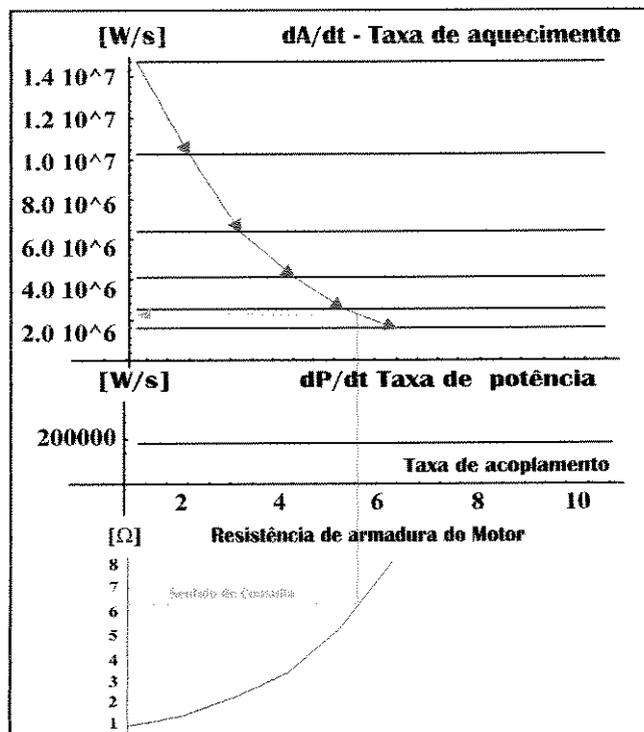


Figura 4.103: Taxas de potência e de aquecimento do motor, em função da resistência da armadura Ra .

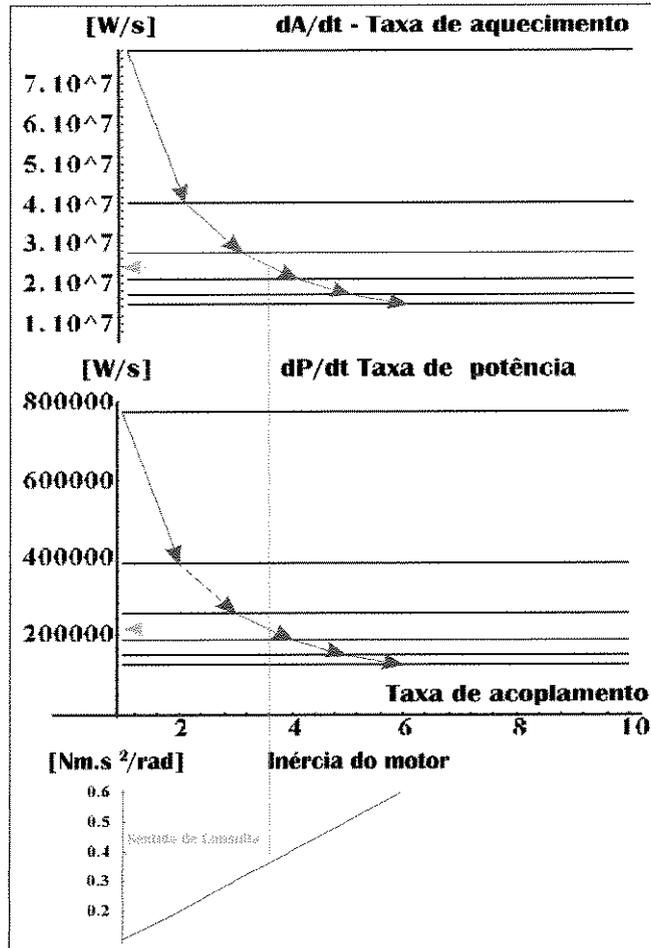


Figura 4.104: Taxas de potência e de aquecimento do motor, em função da taxa de acoplamento kt .

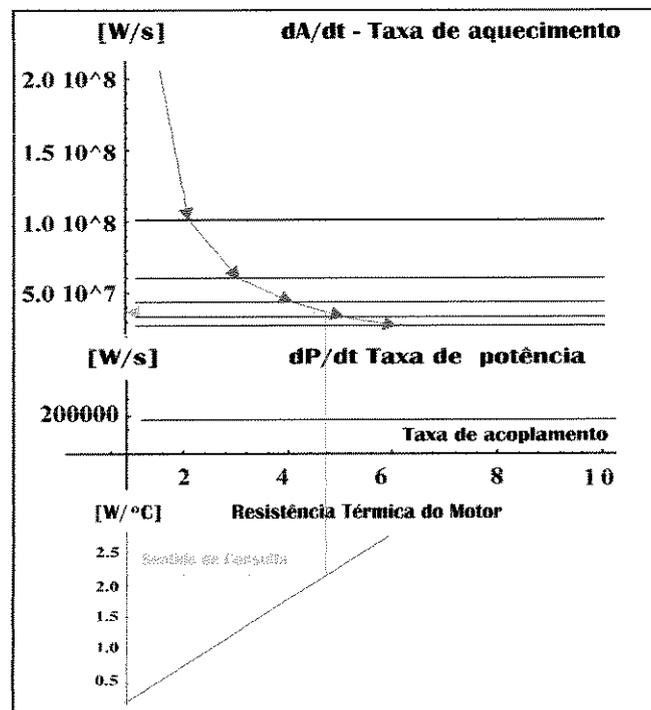


Figura 4.105: Taxas de potência e de aquecimento do motor, em função da Resistência térmica do motor R_{θ} .

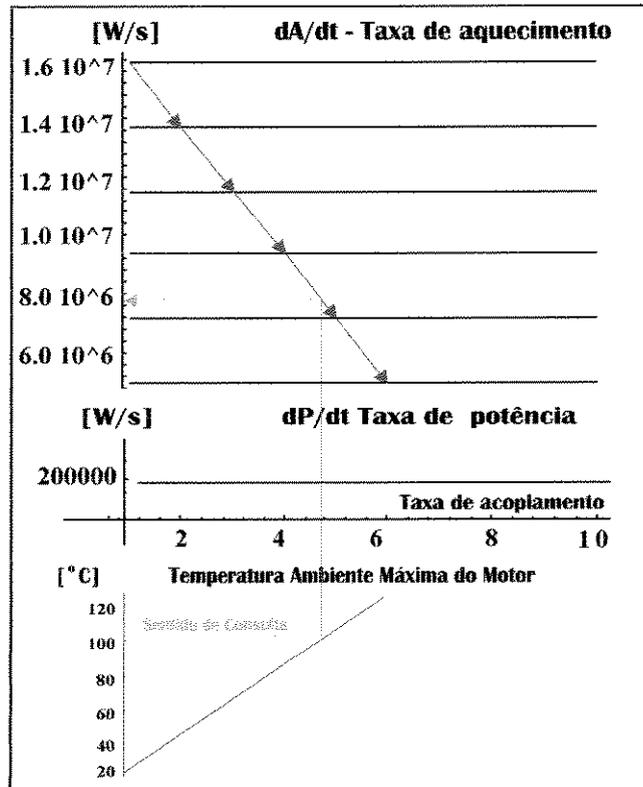


Figura 4.106: Taxas de potência e de aquecimento do motor, em função da Temperatura máxima do ambiente de operação do motor Φ_a .

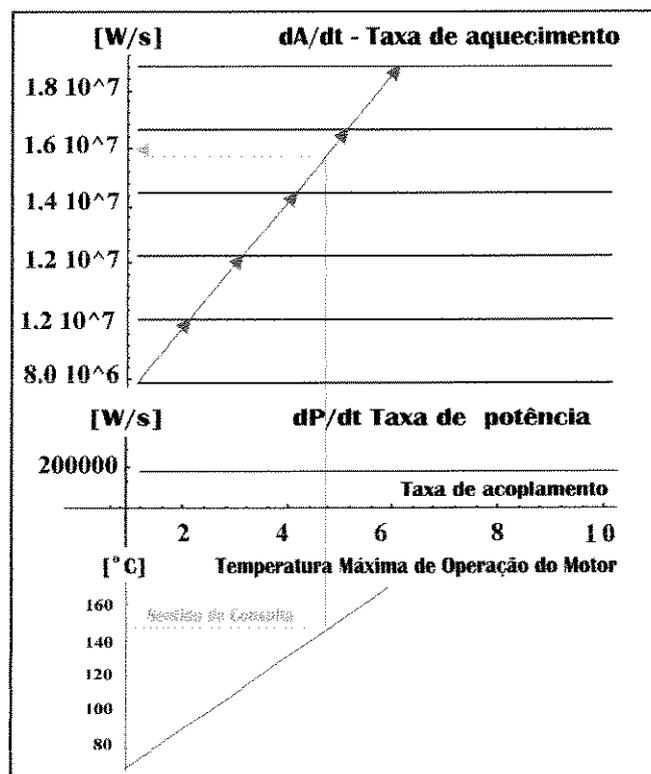


Figura 4.107: Taxas de potência e de aquecimento do motor, em função da máxima temperatura de operação suportada pelo motor.

Refletindo sobre as taxas de potências e de aquecimento do motor, observando as equações 4.1 e 4.2, verifica-se que a **taxa de potência do motor**, depende **diretamente** do quadrado da constante de torque, e corrente elétrica e **indiretamente** do momento de inércia do motor, **não dependendo**, no entanto e nem da temperatura, nem da resistência térmica.

Por outro lado, a **taxa de aquecimento do motor**, depende **diretamente** da temperatura ambiente máxima, da temperatura de operação máxima do motor, do quadrado da constante de torque e **inversamente** das resistências elétricas dos enrolamentos da armadura e resistência térmica do motor, e do momento de inércia do motor. Entretanto elas não dependem da corrente elétrica da armadura do motor.

Entretanto, não é possível uma análise real do que ocorre nas taxas de potências e de aquecimento do motor, se não forem utilizados os perfis de incidências deles nas tabelas, por causa do crescimento predominantemente não linear dos parâmetros. Isto é verificado quando observa-se os gráficos e ábacos das taxas de potências e de aquecimento dos motores para a corrente elétrica na figuras 4.101, constante de torque da figura 4.102, e para a resistência elétrica do enrolamento da armadura na figura 4.103.

4.4.5 Análise Geral dos Critérios de Seleção pelas Taxas de Potência e de Aquecimento

No processo de seleção, as taxas de potência e de aquecimento definem dois critérios de seleção de atuadores. No caso, as taxas de potência ou de aquecimento de cada motor, são comparadas respectivamente com as taxas de aquecimento ou de potência do acoplamento para acionamento indireto reduzido, e com as taxas de aquecimento e de potência da carga para acionamento indireto não reduzido e acionamento direto.

Se o acionamento for direto ou indireto não reduzido: a taxa de potência da **carga** deve ser inferior a taxa de potência do **motor** para garantir que este motor sustente a carga, e a taxa de aquecimento do **motor** deve ser superior a taxa de aquecimento da **carga** para que ele possa acioná-la sem sobreaquecer a um ponto que o danifique.

Entretanto, se o acionamento for indireto reduzido, deve se garantir que as taxa de potências e de aquecimento do **acoplamento** tenham no mínimo um ponto inferior aos valores das respectivas taxas dos **motores**. Se um **motor** não tem uma taxa de potência que possa ser superior a um dos pontos das taxas de potências de **acoplamento**, ele não conseguirá suprir potência suficiente para executar a tarefa para a qual ele está sendo escolhido, apesar do acoplamento.

Para este acionamento indireto no entanto, se a taxa de aquecimento do **motor** não for superior a taxa de aquecimento de **acoplamento**, não haverá um redutor suficiente para garantir que este motor opere com a referida carga. Assim, o calor gerado no enrolamento do motor, devido a corrente elétrica circulando na resistência da armadura, não será totalmente escoado, se acumulando no seu interior a ponto de danificá-lo e acelerar o seu envelhecimento.

Para as taxas de potência e de aquecimento analisadas, se a solução for representada por uma faixa, ela será calculada pela raiz quadrada da diferença entre as taxas do motor e

do acoplamento. Isto define o domínio, ou faixa em que a taxas de redução satisfazem as exigências, tanto para taxa de aquecimento quanto para a taxa de potência.

4.5 Resposta Dinâmica à Otimização do Consumo de Energia

Foi verificado na seção 3.4.2 que existem alguns artigos, que divulgam o emprego de critérios que visam a otimização do consumo de energia, para o acionamento de certas classes de motores de corrente contínua para juntas em movimento incremental. [DC MOTOR, 73] e [TRZYNADLOWSKI 88] consideram que este tipo de técnica deve ser utilizado para cargas constantes, e com velocidade constante e concluem que a definição dos perfis da velocidades das juntas para estes casos devem ser parabólicos para haver um consumo mínimo de energia. Este tipo de técnica é recomendado para acionar equipamentos que precisam racionar de energia e portanto da redução do tamanho das fontes de energia, tais como: satélites, instrumentos de aeronaves, naves espaciais e robôs autônomos, etc.

Um robô autônomo atuando em certas condições constantes de trabalho, ou um manipulador do tipo cartesiano, pode representar um sistema típico onde esta técnica pode ser empregada. Entretanto, no caso de uma junta robótica do tipo rotacional, como foi visto nas inúmeras simulações, não se trata de uma carga constante nem de velocidade constante. No entanto pode-se impor um perfil de velocidade constante nestas juntas.

A integral da velocidade no intervalo de operação deve ser igual ao deslocamento de cada junta. Assim, se pode determinar diversas formas de perfis de velocidade, tais como: parabólico, retangular, triangular, ou constante (quadrado). Em [DC MOTOR, 73] é mostrado que com a utilização do perfil de velocidade trapezoidal, que é mais viável de ser implementada, gasta-se 12,5% de energia a mais que o emprego do perfil de velocidade parabólico, enquanto na implementação do perfil de velocidade triangular que é ainda mais simples, requer um consumo de energia que chega ser 20,83% superior ao consumo obtido com o perfil de velocidade parabólico.

Como a economia de energia e a redução do tamanho dos equipamentos são aspectos atualmente consideráveis, investigou-se a hipótese de aplicação dos perfis de velocidades com a finalidade de se reduzir o consumo de energia. Considerando-se que as juntas dos manipuladores pudessem apresentar condições do emprego de motores para movimento incremental, três tipos de simulações foram elaboradas para este estudo: a cinemática, a dinâmica e a operacional, as quais serão apresentadas e discutidas nas duas próximas seções: Na primeira seção mostra-se os resultados das simulações e o comportamento cinemático e dinâmico, na seguinte, trata-se do comportamento operacional de um manipulador. As condições de operações, classe, características e tarefas do manipulador considerado, são mostradas na tabela 4.20.

4.5.1 Técnica da Otimização de Consumo de Energia: Resposta Cinemática e Dinâmicas

A otimização do consumo de energia sugerida na seção 3.4.10, em [SILVA, 98b] e no anexo A, consiste em impor ou aplicar os perfis de velocidades ótimos (que são calculados baseados no deslocamento total que cada junta teria em processos cinemáticos convencionais) a cada uma das juntas do manipulador considerado. Neste caso, para o manipulador planar de 3 graus de liberdade simulado através do programa AAMMOVISA e discutido no anexo A, conforme as técnicas mostradas em [DC MOTOR, 73], os perfis de velocidades são mostrados na figura 4.109, os perfis de posição angular e aceleração obtidos com isto são ilustrados nas figuras 4.108 e 4.110. As simulações dos esforços dinâmicos visam verificar o efeito dos quatro perfis de velocidades citados acima no modelo dinâmico, que por sua vez influi no processo de seleção de atuadores. Para esta verificação, veja os esforços das juntas 1, 2 e 3 ilustrados nas figuras 4.111 a 4.113 e depois simultaneamente na figura 4.114.

ORDEM	ITEM	DESCRIÇÃO DO ITEM
a	Número de pontos de amostragem	50 pontos
b	Tipo de garra	Simplex
c	Tipo de robô	Cotovelo planar
d	Perfil de Tempo	Não importa
e	Centro de massa	Metade do elo
f	Algoritmo cinemático	Aproximação polinomial
g	Cinemática - (com determinação dos perfis de velocidade das junta para minimização de consumo de energia)	1) perfil parabólico (ótimo) 2) perfil trapezoidal 3) perfil triangular 4) perfil constante
h	Estrutura	Simplex tipo cotovelo
i	Modelo Dinâmico	Adaptativo gerado pelo programa (AMODIRO)
j	Carga na garra	nula
k	Trajeto	segmento (-0.3 , 0.9, 0.0) a (0.8 , 0.1, 0.0)
l	Comprimento da elo 1	50 [cm]
m	Comprimento da elo 2	50 [cm]
n	Comprimento da garra	10 [cm]
o	Tempo de percurso, ou tarefa	5 [segundos]
p	Orientação da garra	variando de 135° até 10°
q	Classe do robô	SSS-xxx-DDD-123
r	Graus de liberdade	3 GL

Tabela 4.20: Condições do manipulador para análise da alteração carga ou esforços externos na garra.

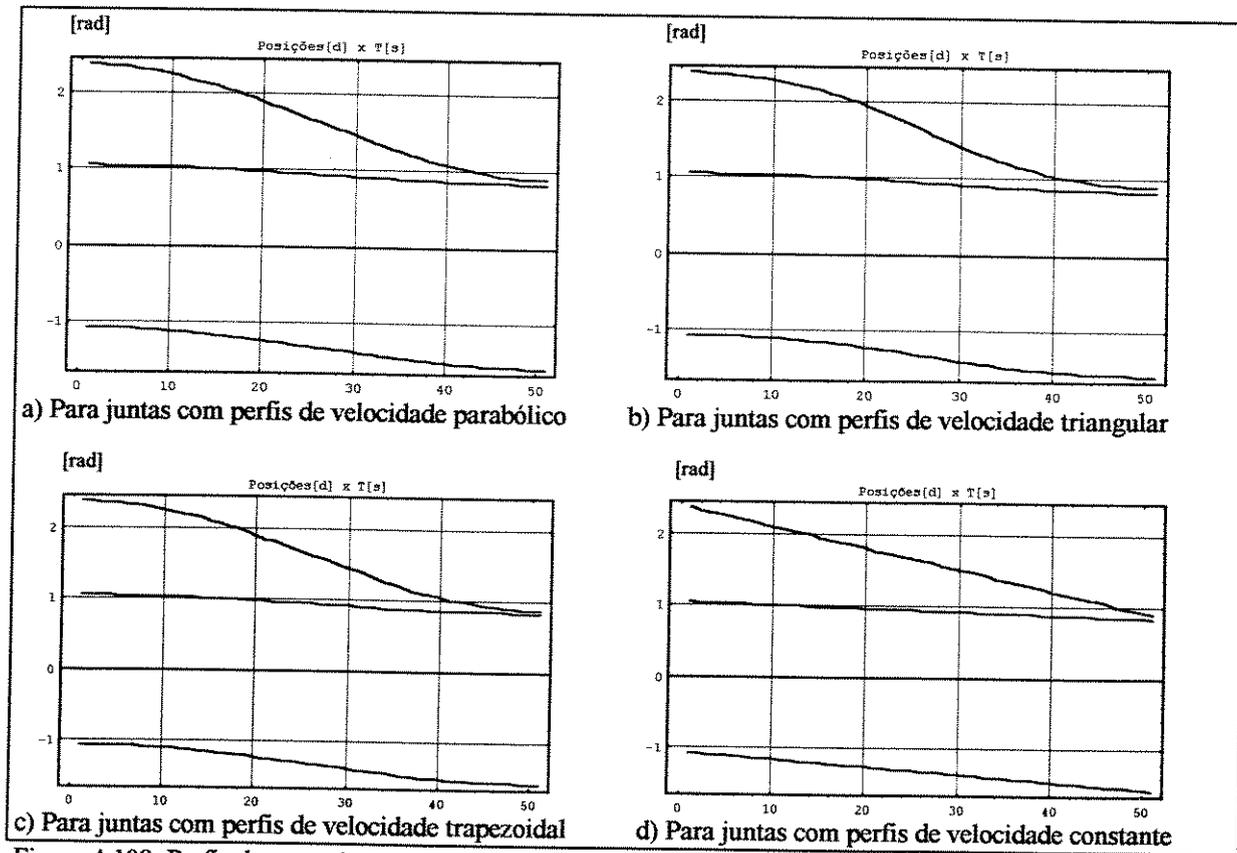


Figura 4.108: Perfis de POSIÇÕES ANGULARES das 3 juntas, para análise da otimização de consumo de energia

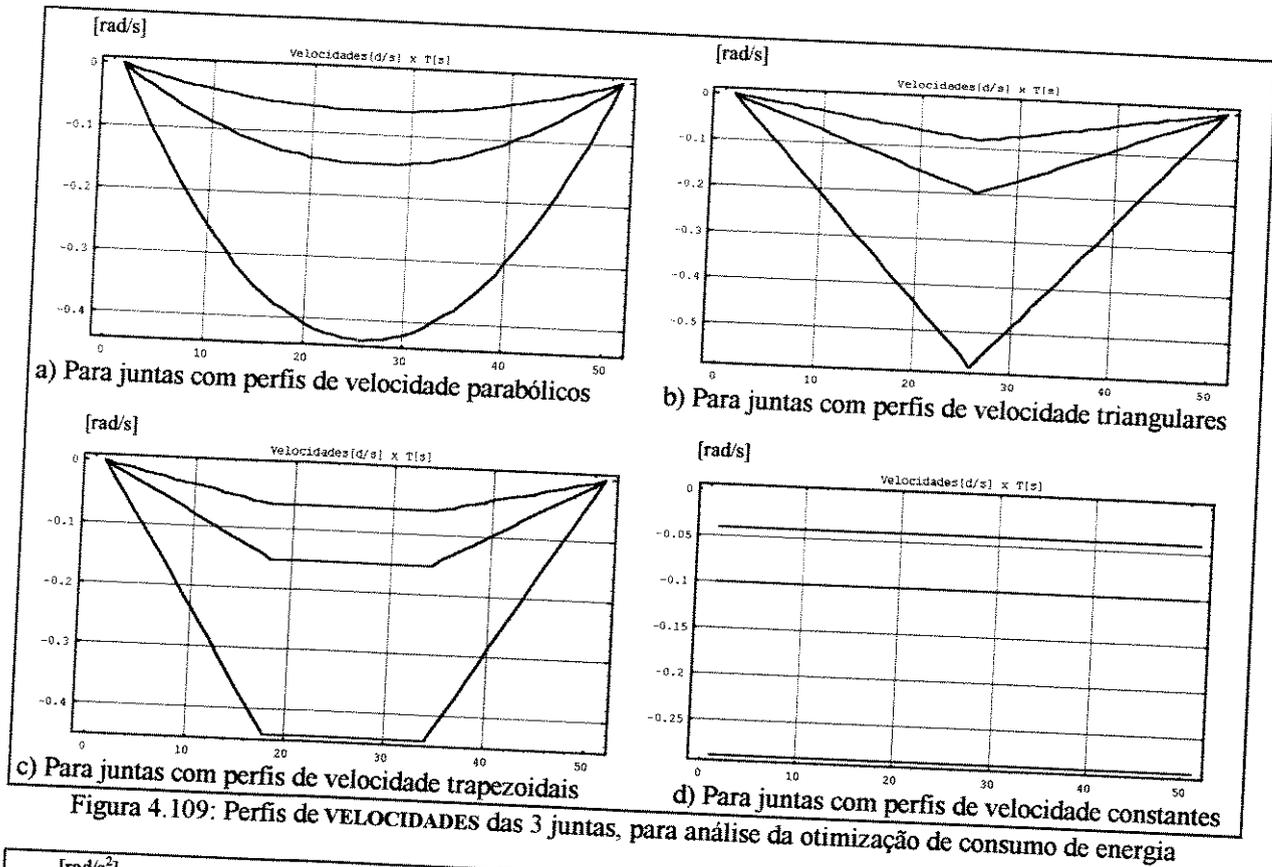


Figura 4.109: Perfis de VELOCIDADES das 3 juntas, para análise da otimização de consumo de energia

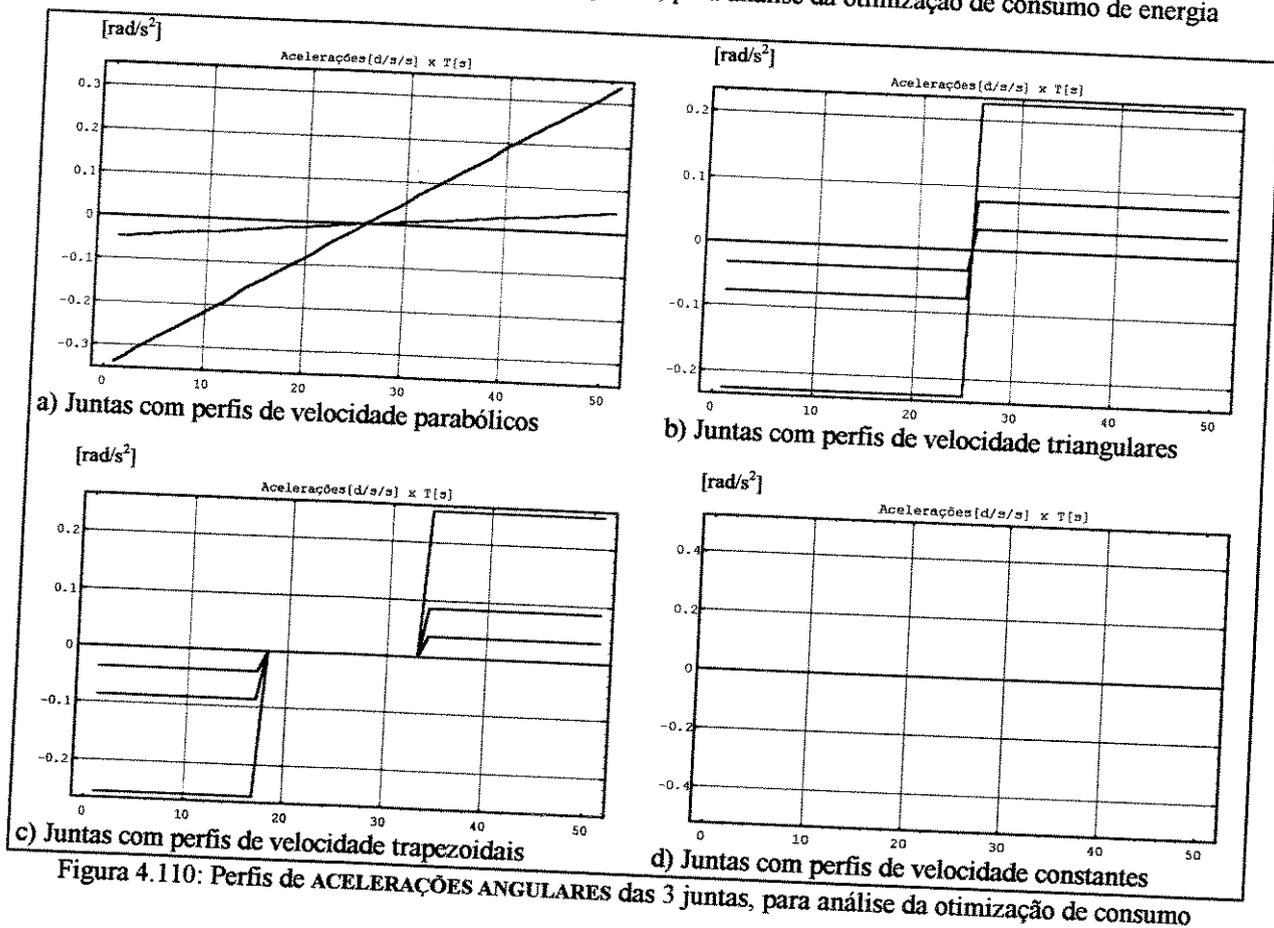


Figura 4.110: Perfis de ACELERAÇÕES ANGULARES das 3 juntas, para análise da otimização de consumo

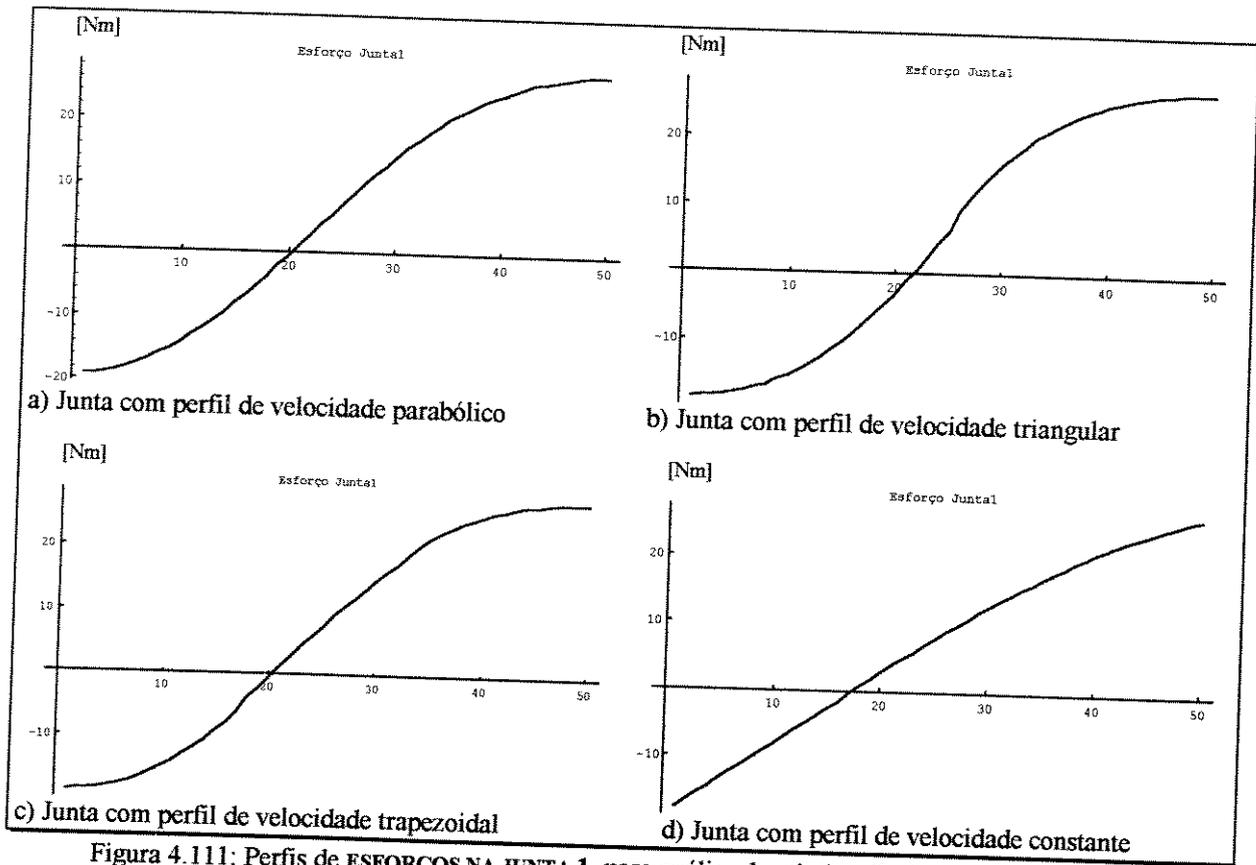


Figura 4.111: Perfis de ESFORÇOS NA JUNTA 1, para análise da otimização de consumo de energia

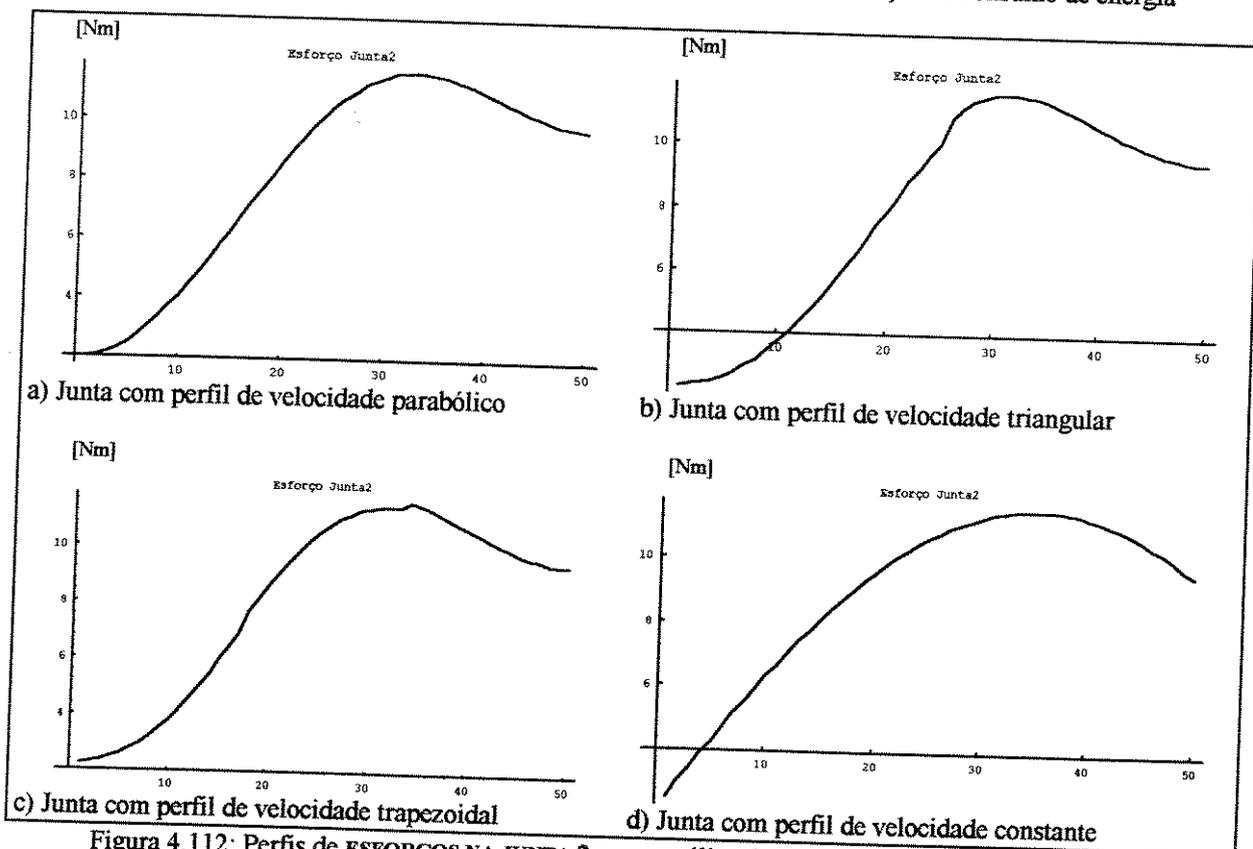


Figura 4.112: Perfis de ESFORÇOS NA JUNTA 2, para análise da otimização de consumo de energia

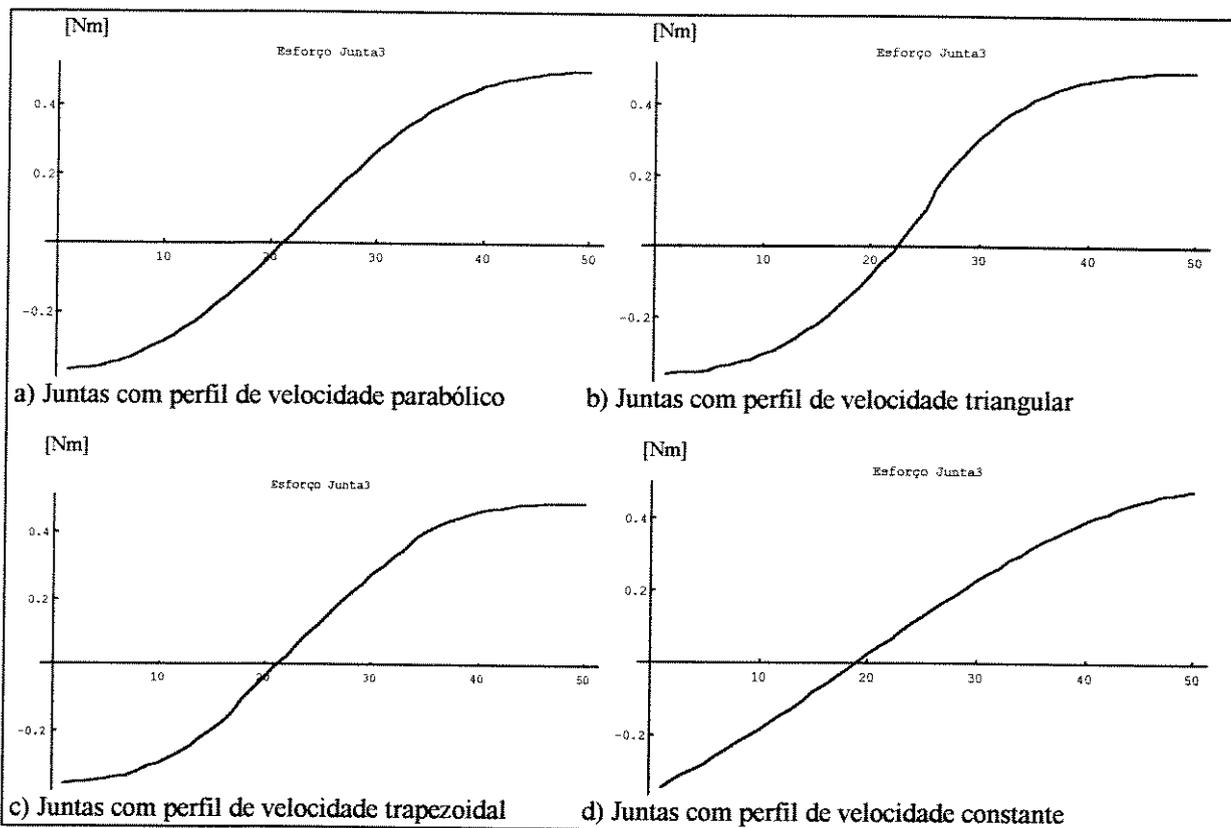


Figura 4.113: Perfis de ESFORÇOS NA JUNTA 3, para análise da otimização de consumo de energia

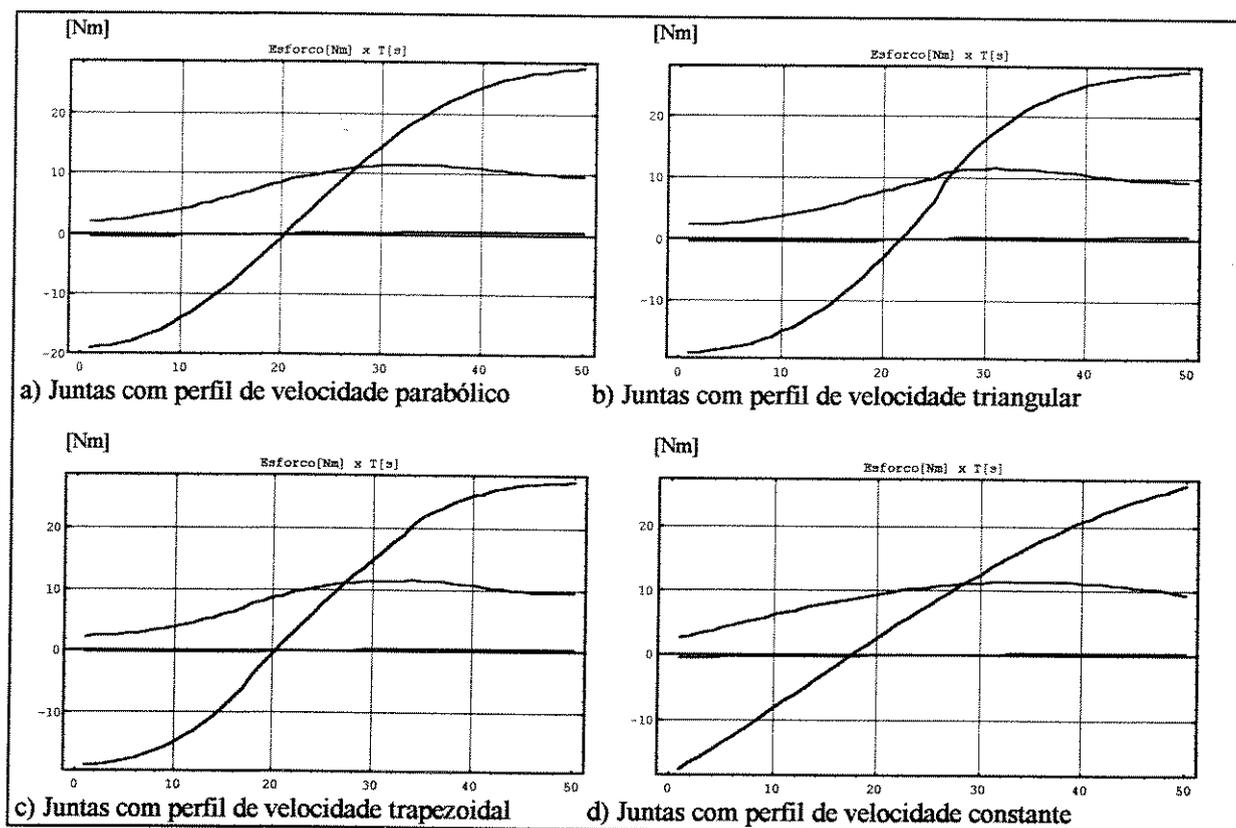


Figura 4.114: Perfis de ESFORÇOS NAS 3 JUNTAS, para análise da otimização de consumo de energia

O conhecimento dos perfis dinâmicos das outras simulações se deu no início deste capítulo, mas nesta seção verifica-se que os perfis cinemáticos e tem curvas mais suave do que nos casos anteriores. Pode se verificar que entre os quatro casos de perfis de velocidade distintos utilizados, não existem diferenças visuais claras nas respostas, exceto quando a velocidade adotada é constante, entretanto este caso é impraticável, porque é impossível impor os degraus de velocidade exigidos na partida e frenagem para um motor acionando uma junta, porque ele tem que vencer a inércia e viscosidade associadas ao eixo.

Aproveitando as circunstâncias, pode-se verificar que a modelagem dinâmica é eficiente e sensível também a este tipo de procedimento. Porque ele modifica, os valores de pico, médios e eficazes dos esforços das juntas na realização das tarefas, os quais influem diretamente nos processo de seleção de atuadores, devidamente equacionados no capítulo 3.

4.5.2 Simulação do Desempenho de um Manipulador com Algoritmo de Otimização de Consumo de Energia

Nesta seção, estuda-se o comportamento operacional da ponta da garra se movendo entre dois pontos. De um a outro ponto, são impostos **tipos de perfis de velocidades** diferentes às juntas acionadas com movimento incremental, veja na figura 4.119, que a garra, sofre um **desvio** cujo valor **máximo** é indicado pela seta azul, e não passa pelo percurso direto e esperado que é indicado pela seta alaranjada. As figuras seguintes, mostram como este desvio é influenciada ainda por quatro fatores: a **distância entre o ponto de operação da garra** e a base do robô indicada em cor lilás (figura 4.116), a **extensão** (figura 4.117), o **sentido** (figura 4.118) e a **direção do deslocamento** da ponta da garra (figura 4.119).

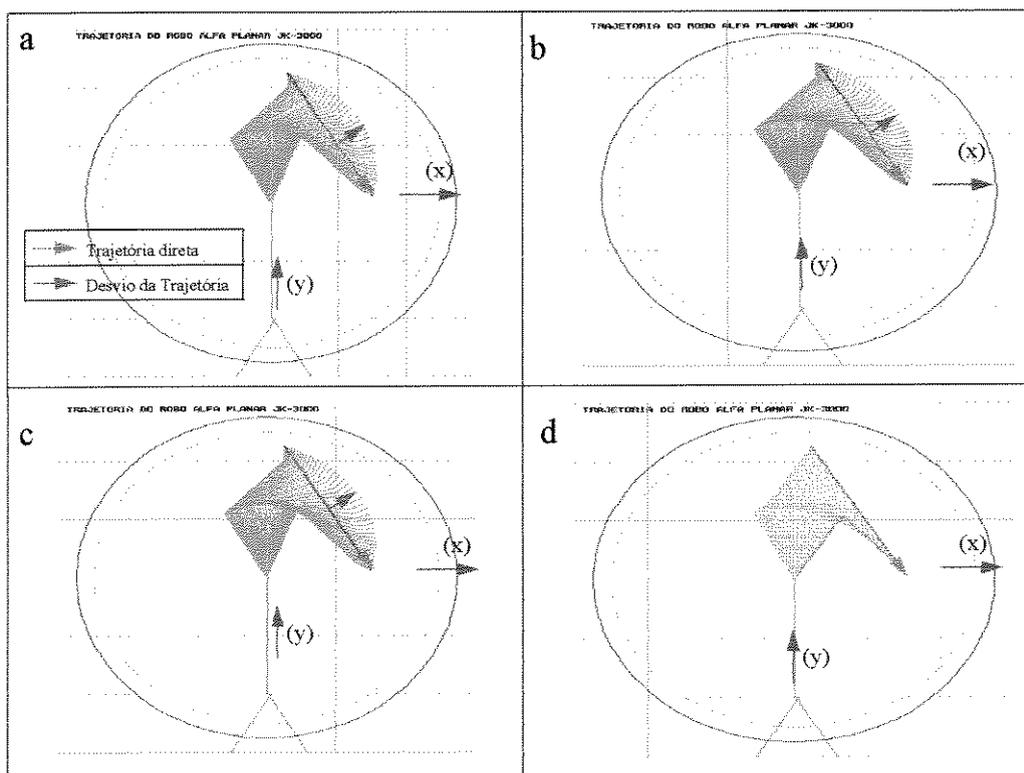


Figura 4.115: Trajetos da garra do robô, para perfis de velocidades das juntas, a) parabólico, b) trapezoidal, e c) triangular, d) sem imposição do perfil de velocidade para otimização do consumo de energia.

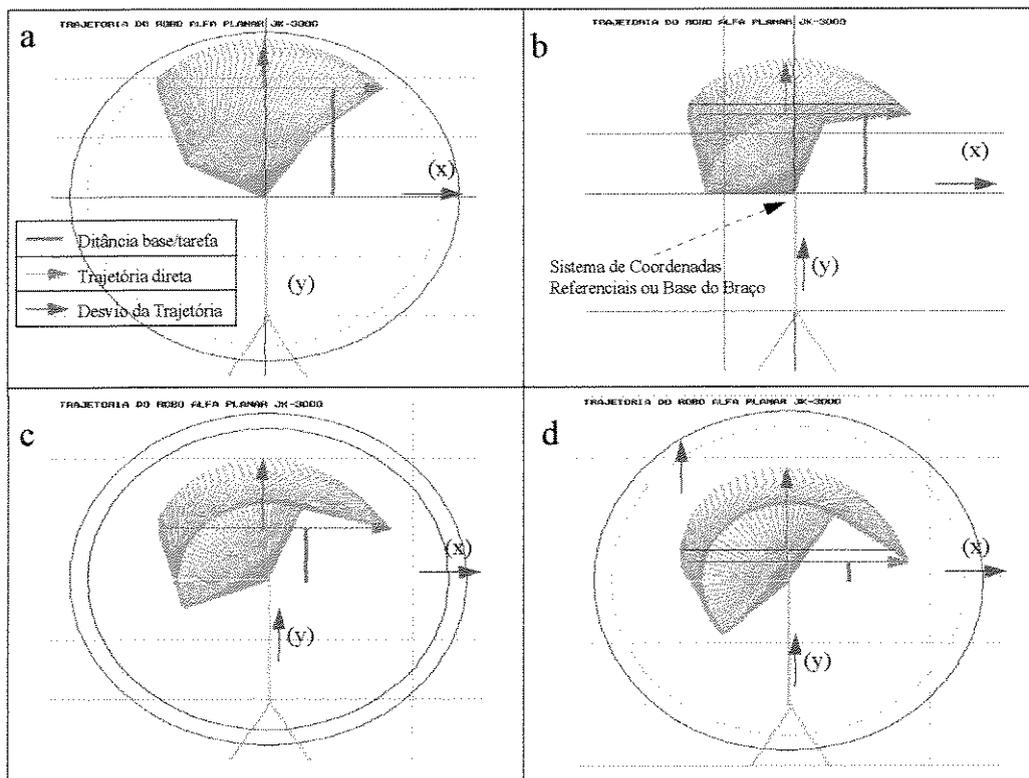


Figura 4.116: Aumento do erro de percurso da garra, com o afastamento da tarefa do centro do sistemas de coordenadas da base. Desenhando reta de 0.4[m], a a) 0,2[m], b) 0,4[m], c) 0,6[m], d) 0,8[m].

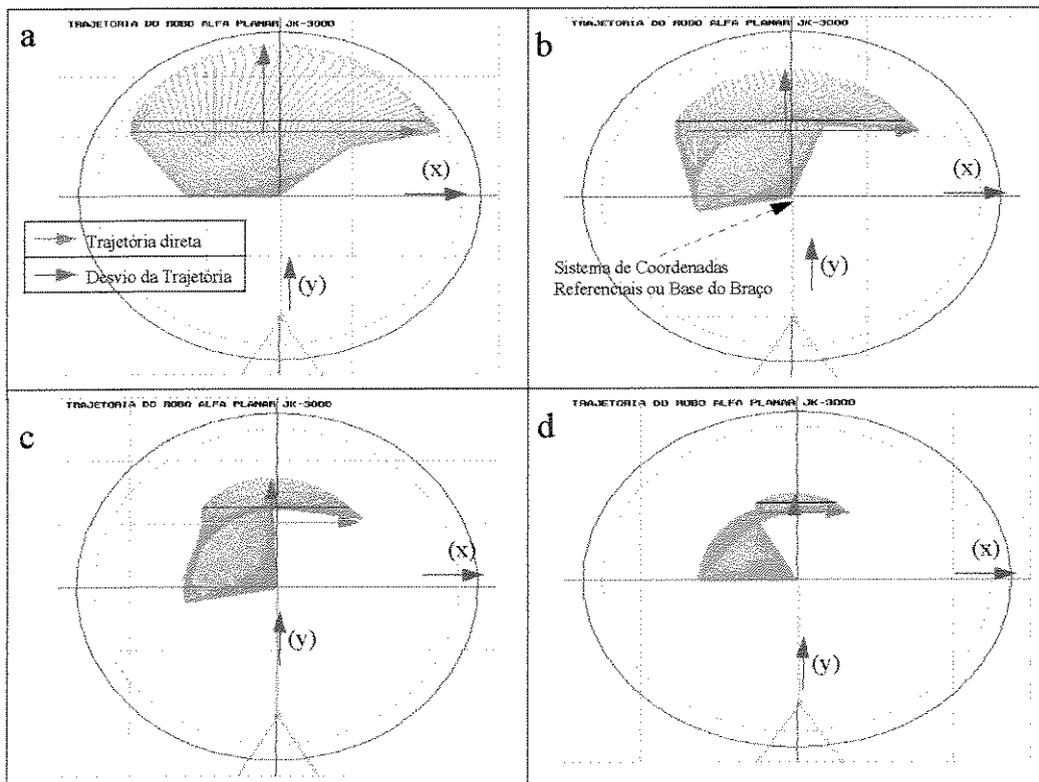


Figura 4.117: Aumento do erro de percurso da garra do manipulador, com o alargamento da tarefa. Desenhando segmentos de retas concêntricas de: a) 0,4[m], b) 0,8[m], c) 1,2[m], d) 1,6[m], de largura.

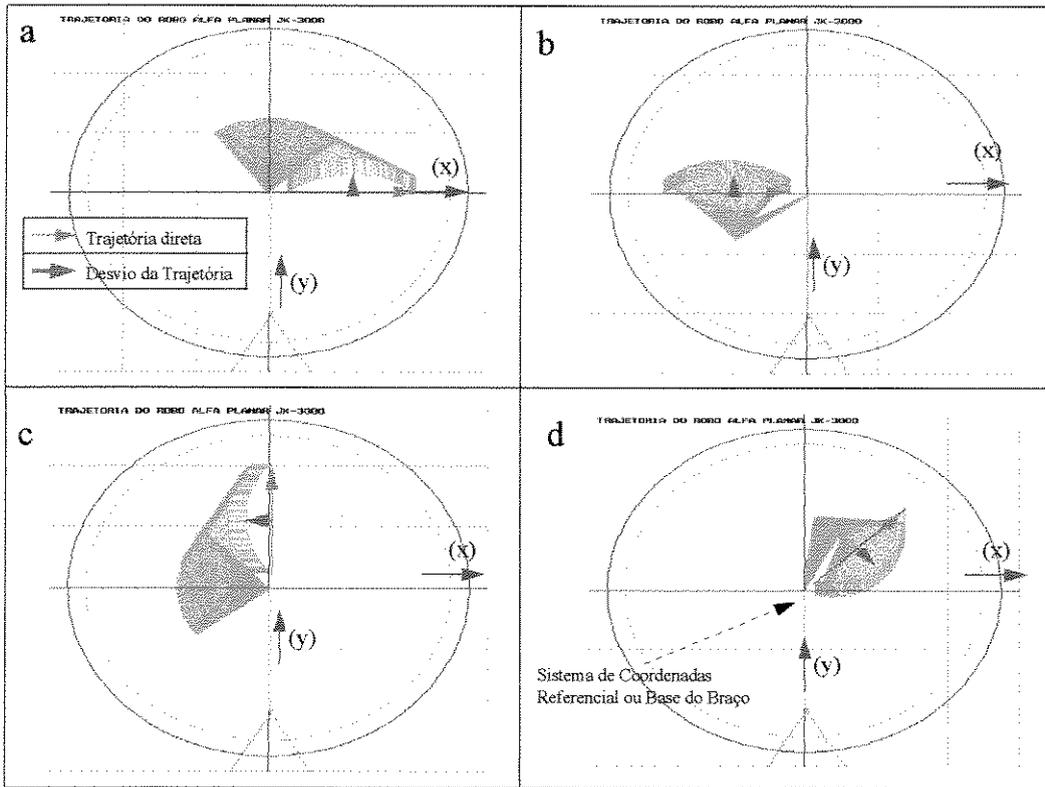


Figura 4.118: Erro de percurso da garra do manipulador constante, para garra seguindo trajetórias nas direções, a) horizontal b) horizontal c) vertical d) oblíqua.

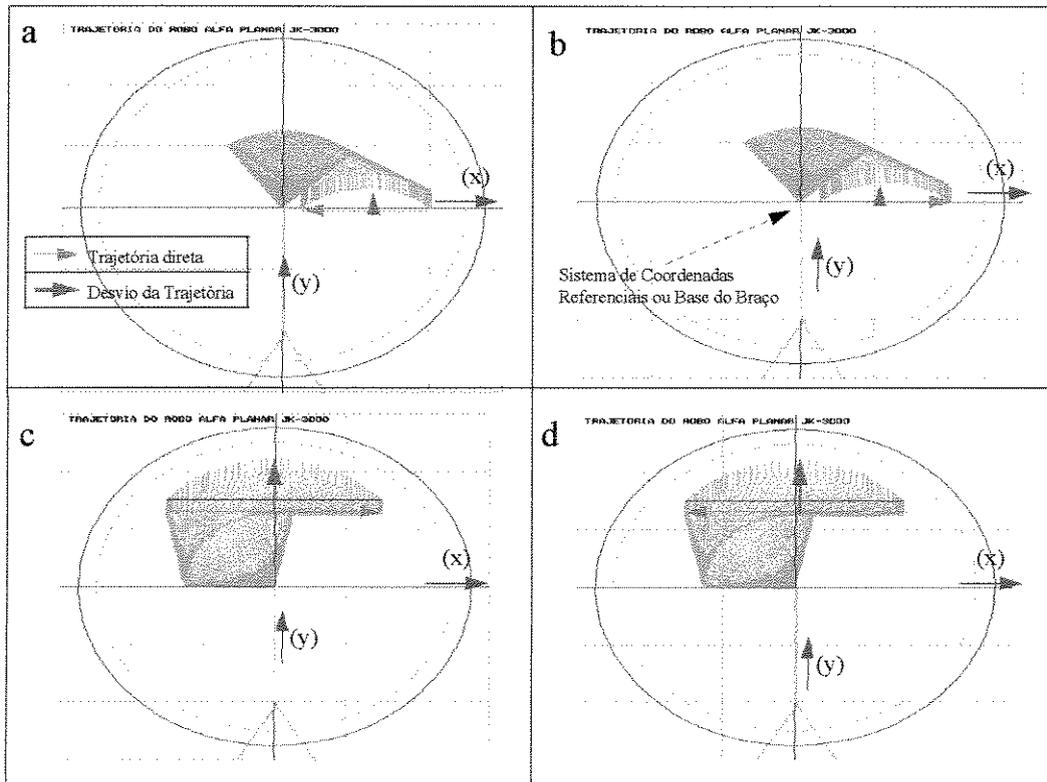


Figura 4.119: Erro de percurso da garra do manipulador constante, para garra seguindo trajetórias em sentidos opostos, a) para esquerda b) para a direita, c) para a direita d) para a esquerda

As últimas cinco figuras ilustram situações interessantes sobre o assunto desta seção. Os diferentes **tipos de perfis velocidade impostos às juntas** produzem respostas com formas e desvios semelhantes. Observe que para o emprego dos perfis de velocidade parabólico trapezoidal, e triangular apresentados, respectivamente, nas figuras 4.115a, 4.115b, e 4.115c, a ponta da garra do manipulador se desloca entre os pontos iniciais e finais da tarefa, fazendo um arco com um **desvio** que é indicado pela seta de cor azul, e não percorre a **linha direta** cor de laranja que liga os extremos iniciais e finais da tarefa, como ocorre na figura 4.115d. Como se pode constatar através das ilustrações, se for desejado que a garra siga de um a outro ponto sem importar o percurso seguido, então o manipulador cumpriu a tarefa e economizou energia. Mas, uma vez desejado que a garra siga diretamente o percurso, como na figura 4.115d, não se pode impor o perfil de velocidade às juntas, nem garantir redução de consumo de energia.

A partir da constatação do surgimento do desvio indicado no parágrafo anterior, foi investigado o comportamento ou a evolução deste desvio ou erro para a influência dos seguintes aspectos da tarefa: **distância da garra** ao centro do sistema de coordenadas referencial do robô, **extensão, sentido e direção** do percurso da ponta da garra entre o início e final da tarefa. Os resultados destas investigações foram mostrados nas figuras 4.116 a 4.119.

A figura 4.116 mostra que houve aumento do desvio máximo da trajetória da garra, em relação à **distância mínima entre a reta que liga os pontos iniciais e finais da trajetória da garra e a base do manipulador**. Para se chegar aos percursos de operação da garra mostrados na figura 4.116, foram estabelecidas duas condições: as distâncias ou comprimento da trajetória da garra foi mantida em $4m$, a distância mínima da trajetória direta à base do manipulador, indicada em cor lilás, foi fixada em $0,2m$ na figura 4.116a, $0,4m$ na figura 4.116b, $0,6m$ na figura 4.117, e finalmente $0,8m$ na figura 4.116c. Como se pode ver, o desvio máximo indicado em cor azul, aumenta com a proximidade da ponta da garra à base do braço, ou centro do sistema de coordenadas referencial do manipulador que é indicado pelo cruzamento dos eixos de cor vermelha.

A figura 4.117 mostra que o desvio máximo da trajetória da garra aumenta proporcionalmente à **extensão do deslocamento da ponta da garra** ocorrido entre o início e o final da reta. Para esta simulação, fixou-se a distância mínima entre a reta que liga os pontos iniciais e finais da tarefa e a base do braço do robô em $0,5m$, e adotou-se a distância entre os pontos iniciais e finais da tarefa, iguais a $0,4m$ na figura 4.117a, $0,8m$ na figura 4.117b, $1,2m$ na figura 4.117c e $1,6m$ na figura 4.117a.

As simulações das figuras 4.118 e 4.119, foram realizados para verificar a alteração intensidade do desvio máximo da ponta da garra, com a mudança da **direção e do sentido do deslocamento da garra**. As condições de ensaio da figura 4.118 foram: a manutenção do ângulo da garra constante em relação aos eixos do sistema de coordenada referencial, localizado na base do manipulador, fazendo a ponta da garra percorrer $3m$ de um a outro extremo da trajetória da reta a partir da base do braço do manipulador para três direções diferentes: horizontal, nas figuras 4.118a e 4.118b, vertical em 4.118c e oblíqua no primeiro quadrante na figura 4.118d. Também foi verificado o comportamento com a mudança do sentido da garra, ver figura 4.119 onde se realizou movimentos para a direita e para a esquerda em retas horizontais. Estas duas últimas simulações informam que o desvio não depende da direção nem do sentido de deslocamento da garra no seu espaço de trabalho.

Baseado nesta simulação, confirmou-se que a ponta da garra não deslocará diretamente de um ponto a outro com a imposição dos perfis de velocidades nas juntas de um manipulador não cartesiano, mas geralmente o faz por um arco, quando adotado o modelo de manipulador planar utilizado neste capítulo. A adoção do modelo **planar** facilita a caracterização visual do comportamento do manipulador com a imposição de perfis de velocidade, pois as respostas podem ser melhor distinguidas do que com a utilização de um modelo de um robô **espacial** de muitos graus de liberdade. Os desvios ocorridos na trajetória da garra do manipulador com a imposição dos perfis de velocidade às juntas, visando-se a redução do consumo de energia, ocorrem porque as juntas do manipulador tem um comportamento não linear e portanto não movem no mesmo sentido do deslocamento da garra, pois cada uma das juntas, para ir de um ponto a outro, têm que deslocar com direção e velocidade diferente daquelas impostas pelas demais juntas e pela garra.

Isto não ocorre num manipulador cartesiano, porque seus movimentos são lineares. Como (1) o deslocamento x e y nas direções dos eixos do sistema cartesiano das juntas é linear, (2) este deslocamento é determinado por uma operação linear, (3) esta operação é a raiz quadrada dos quadrados das somas dos movimentos de todas as juntas nas direções de cada um dos eixos do sistema cartesiano referencial $d = \sqrt{x^2 + y^2}$, e (4) o sistema cartesiano referencial é alinhado com os sistemas de coordenadas cartesianos de cada um dos elos, então o movimento da garra também é linear, portanto não sofre os mesmos desvios experimentados pelos manipuladores com juntas rotacionais.

4.6 Os tipos e Modelos de Cargas e os Parâmetros Básicos e Intermediários dos Processos para Seleção de Atuadores, para Manipuladores Acionados Indiretamente.

Esta seção tratará de dois itens importantes na seleção de atuadores, em primeiro lugar a definição das estratégias possíveis de serem empregadas, e em segundo lugar, os parâmetros usados nestas estratégias.

4.6.1 Estratégias de Modelagem de Carga

Neste trabalho foram discutidos dois critérios de seleção de atuadores importantes, o critério do torque e das taxas de potência e o critério do aquecimento. Outras bibliografias, tratam destes critérios, mas foram introduzidas formas e noções novas neste trabalho, por esta razão resolveu-se discutir uma série de combinações destes critérios a partir de algumas estratégias de modelagem diferentes para a carga ou junta. As diferentes estratégias dos modelos adotados são SIMUL, JECA, SHNEY-I, e SHNEY-II que diferem no tratamento do modelo dinâmico das juntas do manipulador.

a) Estratégia SIMUL

Esta estratégia, usa os conceitos dinâmicos obtidos da formulação exata de cada critério. Os torques das juntas e seus parâmetros como momentos de inércias, são as variáveis do processo analisadas durante a tarefa.

No critério dos torques e taxas de potência, esta estratégia usa o valor de pico do torque total, que é definido em função do produto do torque virtual do motor pelo torque da carga da junta para o

acionamento indireto $\dot{P} \propto k_1 \cdot \max[T_{mc} \cdot T_{cx} \cdot G(n)]$, (equação 3.40), e soma destes torques para o acionamento direto, $\dot{P} \propto k_2 [\max[T_{mc} + T_{cx}]]^2$, (equação 3.217).

No critério do aquecimento, para determinar as taxas de aquecimento, são usados os produtos dos valores eficazes dos torques, e a média do produto dos torques instantâneos para o acionamento indireto $\dot{A} \propto k_1 \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck} h(n) + k_2 \overline{T_{mc} T_{ck}}$, (equação 3.121), ao contrário do acionamento direto onde não há acoplamento e se emprega a soma dos quadrados dos torques eficazes e não o produto dos torques eficazes, $\dot{A} \propto k_3 \tilde{T}_{mc}^2 + k_4 \tilde{T}_{ck}^2 + k_5 \overline{T_{mc} T_{ck}}$, (equação 3.221).

b) Estratégia JECA

A estratégia JECA, abre as equações dinâmicas, que se tornam funções dos parâmetros básicos, dinâmicos e cinemáticos da carga, do motor, e do acoplamento. Neste caso e nos dois seguintes, trabalha-se com o modelo dinâmico não adaptativo.

No critério dos torques e das taxas de potências, $\dot{P} \propto k_1 \cdot \max[T_{mc} \cdot T_c \cdot G(n)]$, esta estratégia, usa a soma dos torques que contribuem para a determinação dos torques de carga e virtual do motor, baseados nos valores de picos dos parâmetros variáveis com o processo cinemático, como acelerações velocidades, momentos de inércias e viscosidade da junta, (veja equações 3.6 e 3.2) que neste caso são da forma $T_{ck} = [dij_p(i)\alpha_{cp} + Cijk_p(i)\omega_{vc} + T_{ex_p}]$ e $T_{mc} \cdot [J_m \cdot \alpha_{cp} + B_m \cdot \omega_{cp}]$.

No critério do aquecimento, as taxas de aquecimento são determinadas da mesma forma que no caso anterior. A diferença deste critério nesta estratégia em relação à anterior, é que aqui, cada torque é discriminado em função dos parâmetros cinemáticos instantâneos, enquanto lá, eles são calculados baseado diretamente nos parâmetros dinâmicos, lidando com mais parâmetros, e portanto requerem uma maior discriminação dos parâmetros do modelo, mas foi feita uma simplificação, que consiste em trabalhar com os produtos da média, e não com as médias dos produtos de torques.

$$\dot{A} \propto k_1 \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck} h(n) + k_2 [\overline{dij} \cdot \overline{\alpha_{ck}} + \overline{T_{es}}] \overline{\alpha_{ck}}$$

c) Estratégia SHNEY-I

Esta estratégia, abre as equações dinâmicas, que se tornam funções dos parâmetros básicos da dinâmica da carga e do motor. No critério dos torques e taxas de potências, esta estratégia usa a soma dos torques de picos que contribuem para a determinação dos torques de carga e virtual do motor baseados nos valores de picos dos parâmetros variáveis do modelo dinâmico. O torque de carga é dividido em torque interno, e externo (as perturbações), e o torque motor é considerado ideal, portanto inercial, portanto o torque de carga e torque virtual do motor assumem respectivamente as formas $T_{mc} = J_m \alpha_{cp}$ e $T_{ck} = T_{in_p} + T_{ex_p}$, veja equações 3.3 e 3.8.

No critério do aquecimento, as taxas de aquecimento são determinadas da mesma forma que no caso anterior. Neste caso, o torque de carga médio é dividido em torque de carga interno e torque de carga externo e o torque do motor é considerado puramente inercial., portanto, a taxa de potência depende do produto da média dos torques pela média da aceleração de carga ou da junta

$$\dot{A} \propto k_1 \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_c h(n) + k_2 [\overline{T_{in}} + \overline{T_{es}}] \overline{\alpha_c}$$

d) Estratégia SHNEY-II

Esta estratégia é muito semelhante a anterior, mas o torque motor é generalizado, e não exclusivamente inercial. Assim, o critério da taxa de potência e do torque, depende do produto da soma dos picos do torque da carga e do torque virtual do motor convencional representados genericamente, por T_{mp} e pelo torque de carga que é representado por $T_{ck} = T_{in_p} + T_{ex_p}$, vide equação e 3.8.

No critério da taxa de aquecimento, esta estratégia usa a soma das médias do produto das partes integrantes dos torques integrantes do torque de carga pelo toque do motor conforme a equação $A \propto k_1 \tilde{T}_{mc} \tilde{T}_{ck} h(n) + k_2 [\overline{T_{in} \cdot T_{mc}} + \overline{T_{es} T_{mc}}]$.

A maior diferença entre as estratégias, ocorre para os critérios dos torques e da taxa de potência da estratégia SIMUL, que trabalha com o torque de pico total, enquanto as demais trabalham com a soma dos torques de picos, e dependendo dos picos dos parâmetros variáveis, o que superestima os limites de operação do motor.

4.6.2 Os Parâmetros Básicos

Esta seção mostra o comportamento típico dos parâmetros básicos do processo de seleção de atuadores em função de cinquenta pontos de amostragens, usados nas estratégias mencionadas, visando a determinação dos parâmetros intermediários, e distinção das estratégias. Nesta simulação foi usado o protótipo mostrado na figura 4.27c, cujas características e condições de operação se encontram na tabela 4.8, e o banco de dados é apresentado na listagem B.4 do anexo B.

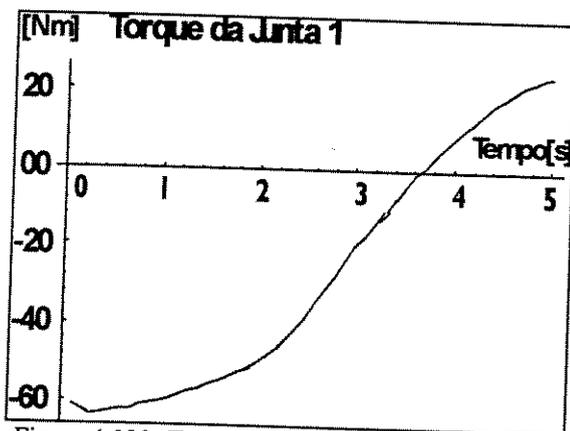


Figura 4.120: Torque de junta 1 Tck .

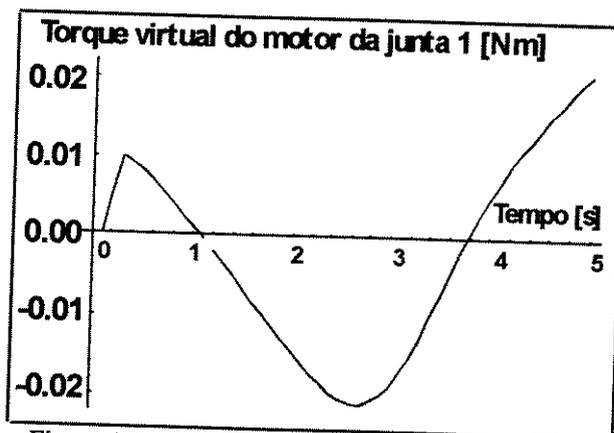


Figura 4.121: Torque virtual do motor da junta 1.

Os torques de carga da junta e torque virtual do motor, são importantes para a definição direta do produto de torques mostrados respectivamente na figuras 4.120, 4.121, que são parâmetros típicos da estratégia SIMUL. É quando o programa encontra o ponto máximo do produto do torque mostrado na figura 4.122, ficam estabelecidos as acelerações, velocidades, taxas de reduções importantes para a determinações da taxa de potência do acoplamento para motor no acionamento indireto. Este valor não ocorre necessária e simultaneamente para os torques de carga e virtual de pico do motor.

O perfil de eventuais taxas de reduções para mínima taxa de potência, é o calculo contínuo da taxa de redução, usando-se uma das equações 3.43 a 349, para todos os pontos do perfis, mas o valor adotado é aquele que determina o máximo produto dos torque de carga pelo torque virtual do motor considerado no momento.

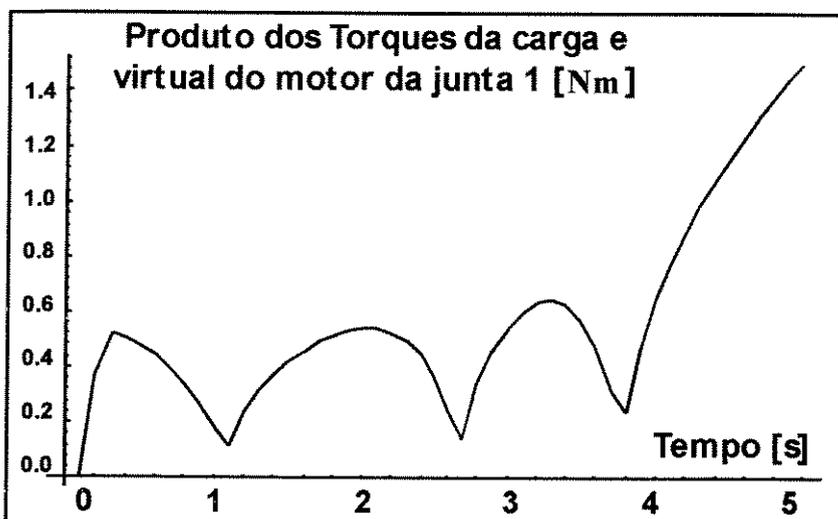


Figura 4.122: Valor absoluto do produto do torque de carga pelo torque virtual do motor para a junta 1.

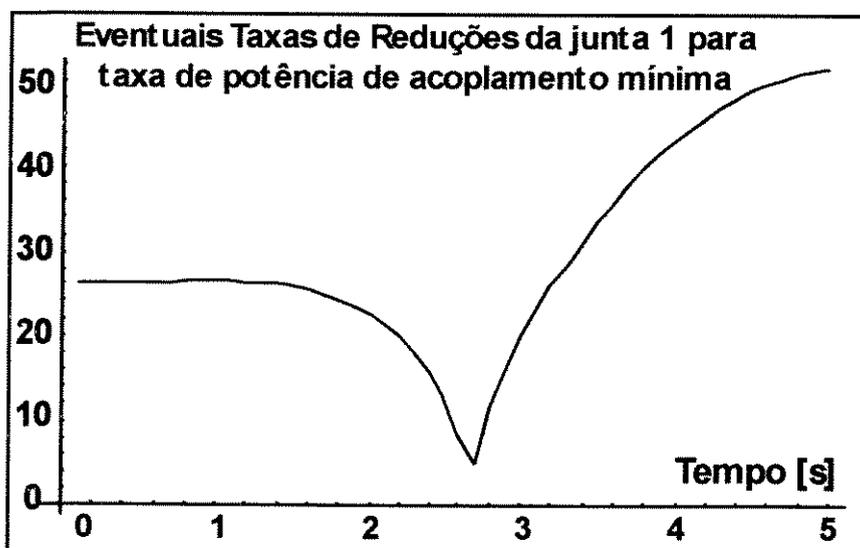


Figura 4.123: Eventuais taxas de reduções, para taxas de potência mínimas para a junta 1.

Outro conceito visualizado aqui é o da determinação da taxa de redução inercial, apresentado por, [PALHARES 94], [SHENYDOR 89] e [SEERING 84], que pode ser usado para a determinação de um valor de partida, para a taxa de redução em programação usando recursividade, que é o processo sugerido por [PALHARES 94], para seleção de motores de corrente contínua para manipuladores.

Os dois gráficos que seguem são os perfis de velocidade e aceleração de carga, que são empregados nas estratégias SHNEY-II, JECA e SHNEY-I, ver figura 4.125 e 4.126. Logo a seguir vem os torque internos e externos, também empregados nas estratégias SHNEY-II, e SHNEY-I veja as figuras 4.127 e 4.128. O estabelecimento dos perfis destas funções são calculados os valores médios e eficazes usados nos critérios de aquecimento dos motores.

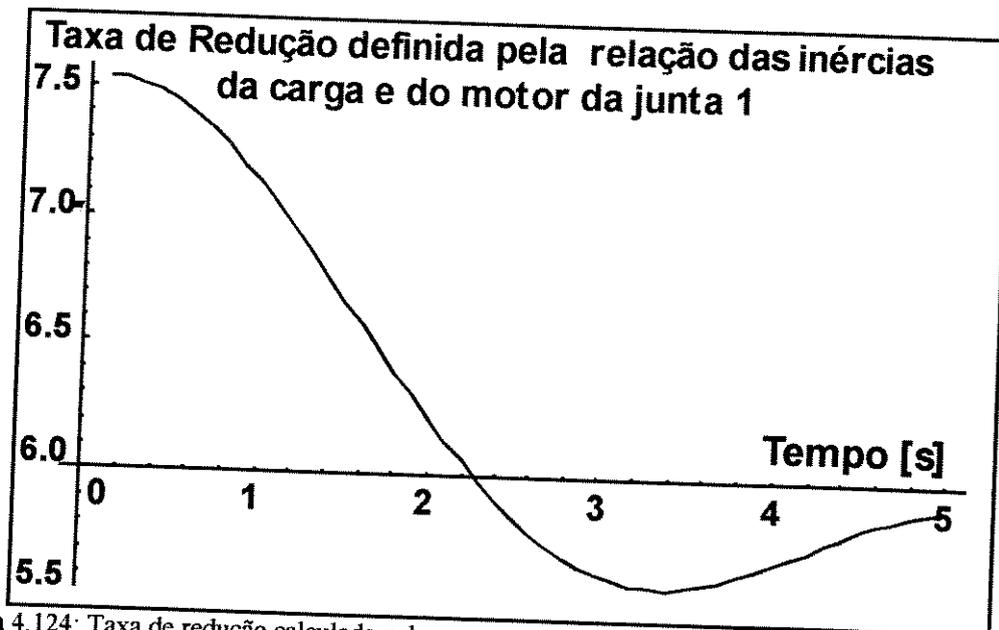


Figura 4.124: Taxa de redução calculada pelos momentos de inércias da carga e do motor para a junta 1

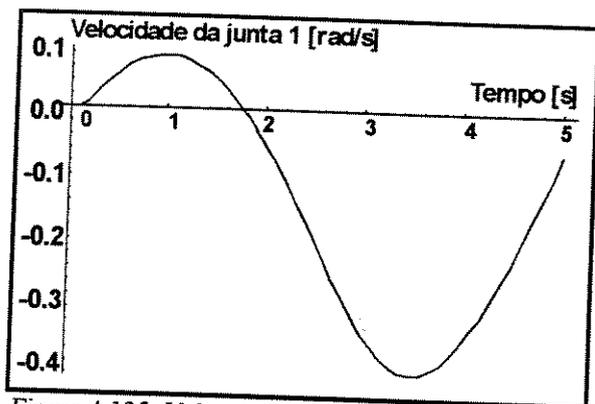


Figura 4.125: Velocidade instantânea de carga para a junta 1.

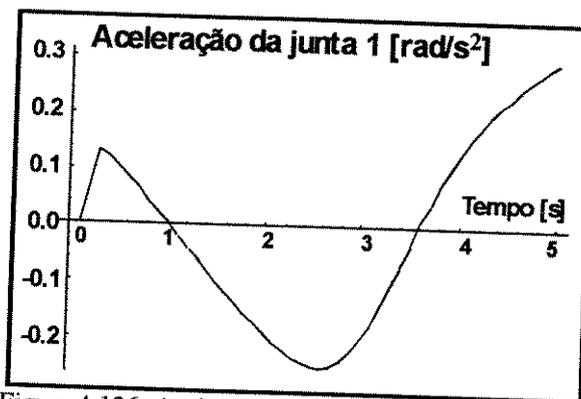


Figura 4.126: Aceleração instantânea de carga para a junta 1

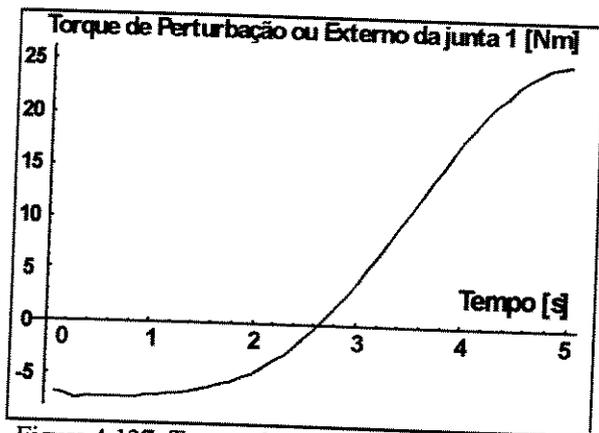


Figura 4.127: Torque de perturbação instantânea da junta 1

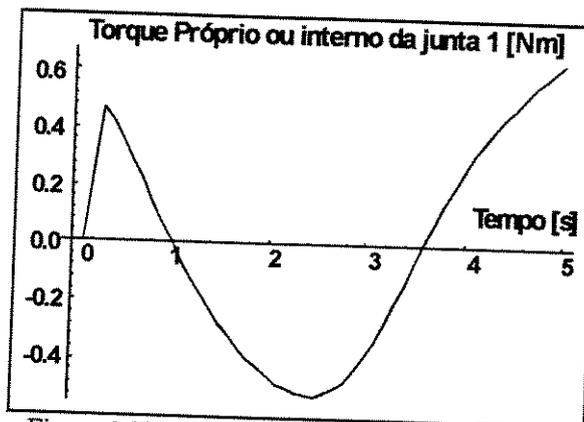


Figura 4.128: Torque Internos, momento inercial mais de atrito viscoso da junta 1

4.6.3 Os Parâmetros Intermediários

Os parâmetros intermediários auxiliam na observação e na verificação da possibilidade dos atuadores atenderem as necessidades de carga e acoplamento nos casos de acionamento indireto, ou somente da carga para o acionamento direto. Neste trabalho, só será tratado o acionamento indireto, por isto serão mostrados em função da taxa de redução.

Os primeiros passos do processo de seleção são as definições das taxas, e dos fatores e dos graus de aquecimento do acoplamento que indiretamente permitem a determinação dos domínios da taxa de redução, e as taxas de redução para taxa de potência e aquecimento mínimas conforme cada critério empregado. A figura 4.129 apresenta o perfil do grau de acoplamento para a estratégia SIMUL, e a figura 4.130 mostra o mesmo grau de acoplamento para as demais estratégias, a saber JECA/SHNEY-I e SHNEY-II.

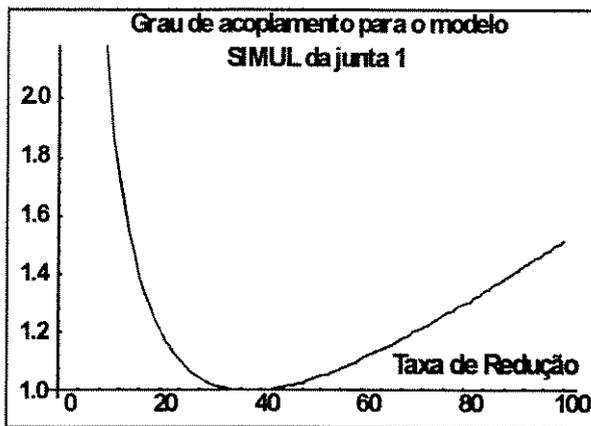


Figura 4.129: Fator de Potência para a estratégia de SIMUL, pela taxa de redução.



Figura 4.130: Fator de Potência para as estratégias (JECA/SHNEY-I e SHNEY-II), pela taxa de redução.

As figuras 4.131 a 4.133, ilustram os perfis dos graus de aquecimento, para as estratégias JECA, SHNEY-I e SHNEY-II, que se mostram ligeiramente diferentes daquele do grau de aquecimento determinado pelo emprego da estratégia SIMUL mostrado na figura 4.134.

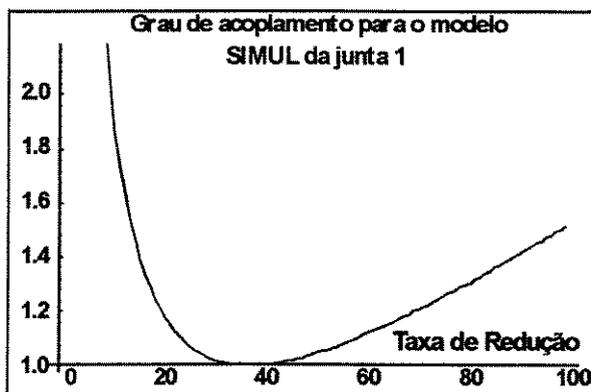


Figura 4.131: Fator de aquecimento para a estratégia (JECA), pela taxa de redução.

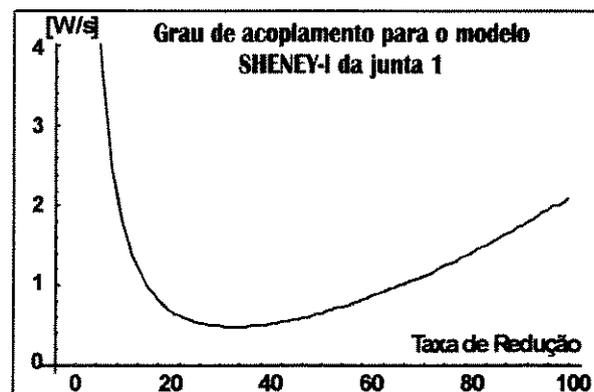


Figura 4.132: Fator de aquecimento para a estratégia (SHNEY-I), pela taxa de redução.

O torque de acoplamento pode ser usado como critério para seleção de atuadores, mas normalmente, usa-se a taxa de potência que trabalha com valores absolutos, independente do sentido do torque. As figuras 4.134, 4.135, e 4.136, mostram os perfis de torques de acoplamento respectivamente para as estratégias, SIMUL, JECA, e SHNEY-I e SHNEY-II.

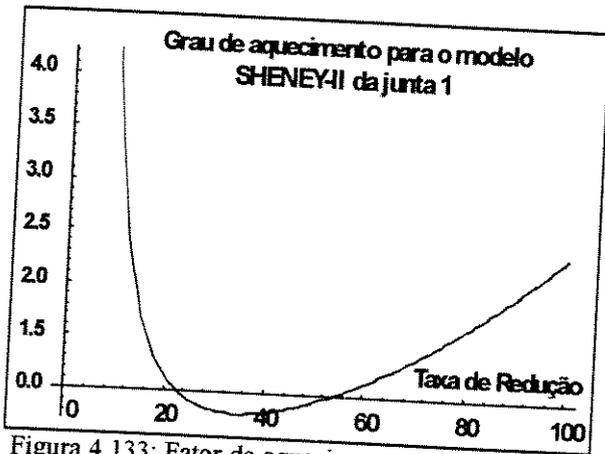


Figura 4.133: Fator de aquecimento para a estratégia (SHNEY-II), pela taxa de redução.

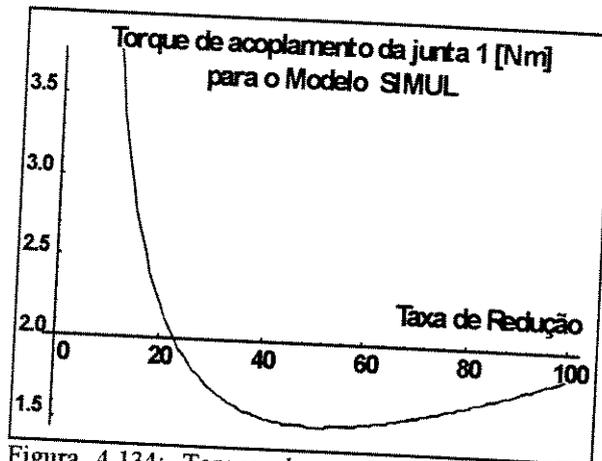


Figura 4.134: Torque de acoplamento x taxa de redução, para estratégia (SIMUL).

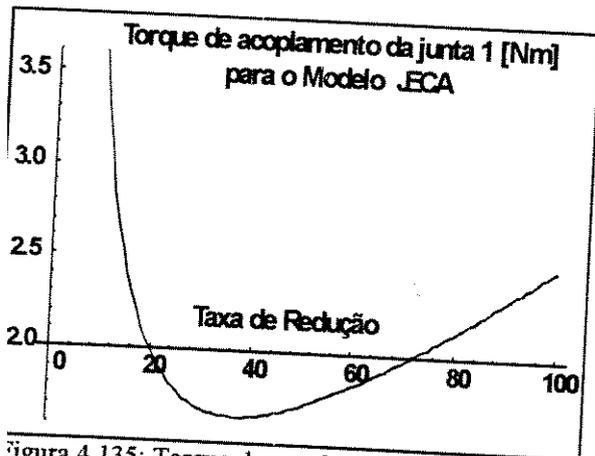


Figura 4.135: Torque de acoplamento para estratégia (JECA), pela taxa de redução.

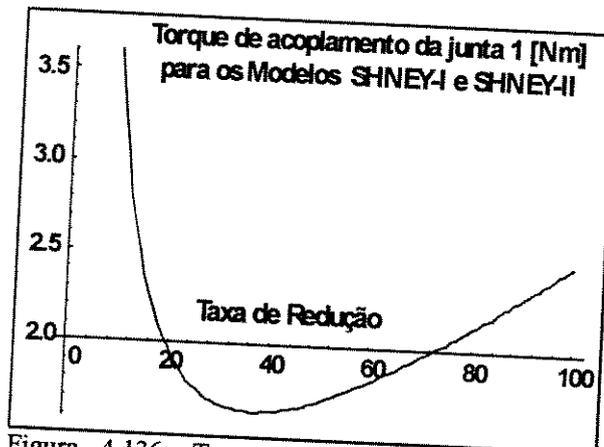


Figura 4.136: Torque de acoplamento para as estratégias (SHNEY-I e SHNEY-II), pela taxa de redução.

Baseado nas definições dos graus e de aquecimento e de acoplamento que definem, respectivamente, as taxas de potência e de aquecimento que permitem a determinação do mínimo da taxa de redução, conforme cada critério definido.

Para ilustração da forma destes perfis para cada estratégia, foram capturados perfis destas funções em cada estratégia. As taxas de potência do acoplamento são apresentadas nas figuras 4.137 para a estratégia SIMUL, 4.138 para a estratégia JECA, e 4.139 para as estratégias JECA/SHNEY-I e SHNEY-II. Nestas figuras pode ser visto que os limites mínimos destas funções, bem como a ordenada do ponto mínimo, ou taxa de redução para taxa de potência mínima é diferente em cada caso.

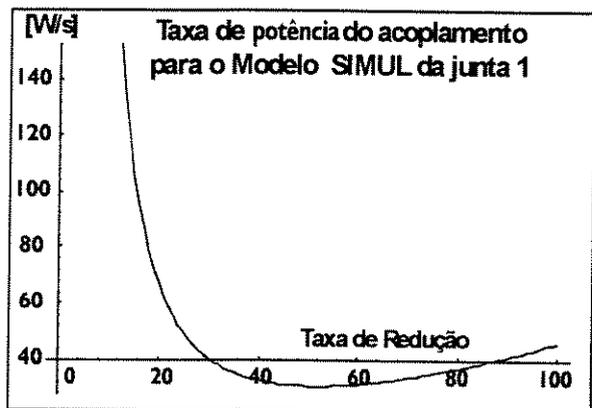


Figura 4.137: Taxa de potência de acoplamento para a estratégia (SIMUL), pela taxa de redução.

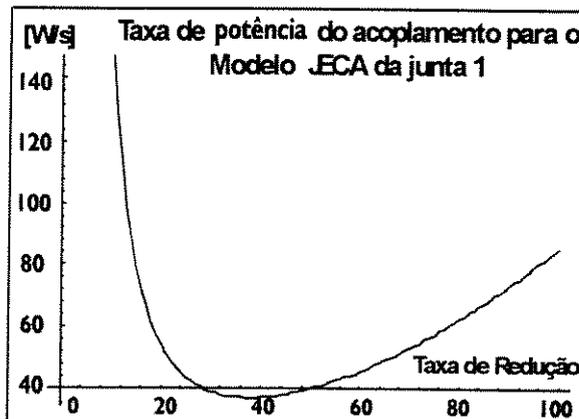


Figura 4.138: Taxa de potência de acoplamento para a estratégia (JECA), pela taxa de redução.

Voltando, a atenção para as taxas de aquecimento do acoplamento, pode se ver através dos gráficos das figuras 4.130 a 4.143, respectivamente, para as estratégias de SIMUL, JECA, SHNEY-I e SHNEY-II que elas são muito semelhantes entre si, apresentando uma ligeira diferença no valor mínimo independente da estratégia usada.

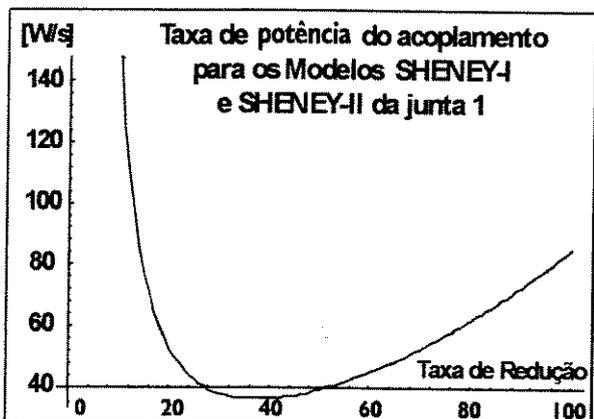


Figura 4.139: Taxa de potência de acoplamento para estratégias (SHENEY-I - SHENEY-II), x taxa de redução.

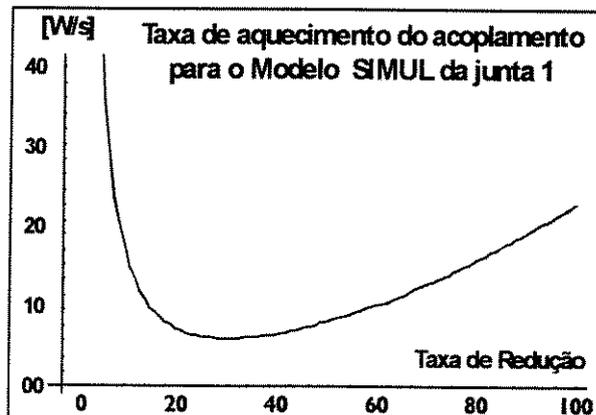


Figura 4.140: Taxa de aquecimento de acoplamento para a estratégia (SIMUL), pela taxa de redução.

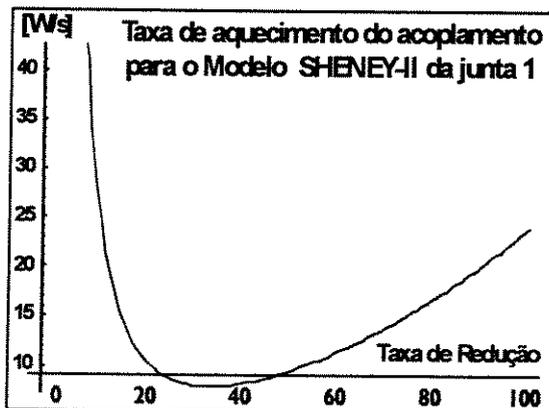


Figura 4.143: Taxa de aquecimento de acoplamento para a estratégia (SNNEY-II), pela taxa de redução.

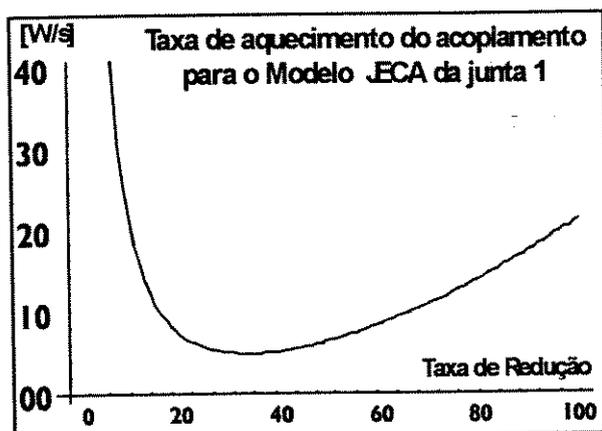


Figura 4.141: Taxa de aquecimento de acoplamento para a estratégia (JECA), pela taxa de redução.

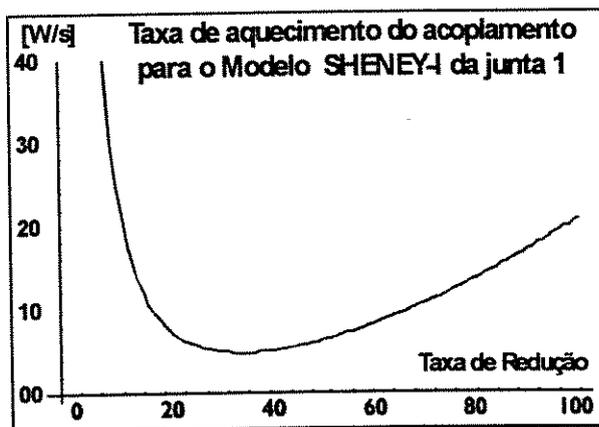


Figura 4.142: Taxa de aquecimento de acoplamento para a estratégia (SHENEY-I), pela taxa de redução.

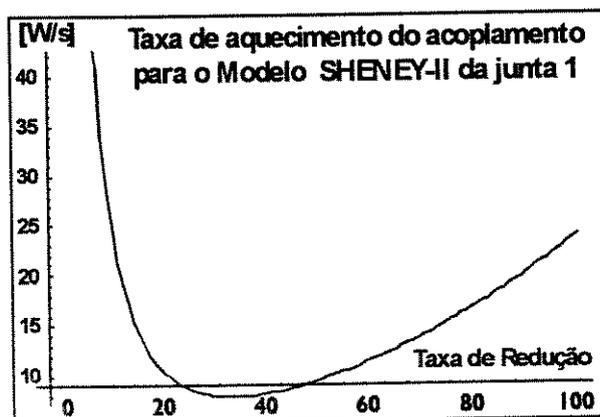


Figura 4.142: Taxa de aquecimento de acoplamento para a estratégia (SHENEY-I), pela taxa de redução.

Além das curvas mostradas até aqui, inúmeros parâmetros são determinados no meio do processo. Alguns destes parâmetros são mostrados na lista B.5 do anexo B.

4.6.4 Relação entre os Parâmetros Intermediários, Estratégias e Modelagem Dinâmica.

Esta seção foi elaborada com a preocupação de caracterizar as diferenças nos parâmetros intermediários mediante as quatro estratégias diferentes propostas para caracterizar e analisar o processo de seleção de atuadores e os diversos tipos de acionamentos das juntas usando efetivamente dois critérios de seleção, o da taxa de potência e o da taxa de aquecimento.

No acionamento indireto, é importante que pelo menos um ponto das taxas de potência e de aquecimento do acoplamento, seja menor que suas correspondentes taxas do motor, para que a seleção seja efetivada com êxito. No caso do acionamento direto são as correspondentes taxas da carga (que são constantes), que devem ser menor do que as taxas do motor, e não as taxas do acoplamento.

Como foi visto também, os parâmetros de seleção de atuadores dependem também da dos parâmetros dinâmicos e conseqüentemente dos parâmetros cinemáticos. Por esta razão, a modelagem dinâmica, e as considerações intrínsecas nelas contidas são relevantes para o processo de seleção de atuadores.

Para mostrar todas estas afirmações, foram feitas algumas simulações que mostram as influências das estratégias de modelagem das juntas nos parâmetros intermediários (taxas de potências e aquecimento de acoplamento) usando-se três condições de modelagem dinâmica de manipuladores que são representadas pelas figuras 4.114, 4.146 e 4.148 que são obtidas, respectivamente, para modelagem adaptativa considerando os atuadores, modelagem adaptativa considerando a estrutura livre, e modelagem não adaptativa. As características e condições do modelo de manipulador usados são especificadas na tabela 4.8 e a sua configuração de acionamento é ilustrada na figura 4.27c, indicando que se trata de um modelo do tipo, (SSS-RRR-III-B12), e os dados para simulação são aqueles apresentados na listagem B.4.

Nas três condições de modelagem sugeridas, são definidas, duas que trabalham com a modelagem de Euler-Lagrange considerando o centro de massas dos elos situados no meio deles. Os passos da seleção de atuadores na **primeira** foram ilustrados nas duas subseções anteriores, começando pela figura 4.108 que mostra o torque de carga da junta 1, indo até a figura 4.144 que considera a influência das estruturas dos atuadores na estrutura dos elos do manipulador. A **segunda** condição não tem todos os passos do processo de seleção de atuadores ilustrados, mas o torque de carga é ilustrado na figura 4.145 onde seu modelo caracteriza-se por desprezar a influência dos parâmetros estruturais dos atuadores e seus acessórios como parte integrantes dos elos, ou seja considera a estrutura do manipulador livre.

A **terceira** condição, usa o modelo dinâmico não adaptativo obtido em [LATRE 94], e seu centro de massas se concentra na ponta da estrutura do manipulador, cujo resultado, para a junta 1 produz o torque mostrado na figura 4.147. Neste caso os parâmetros dos atuadores não entram na definição estrutural dos elos, como no primeiro caso.

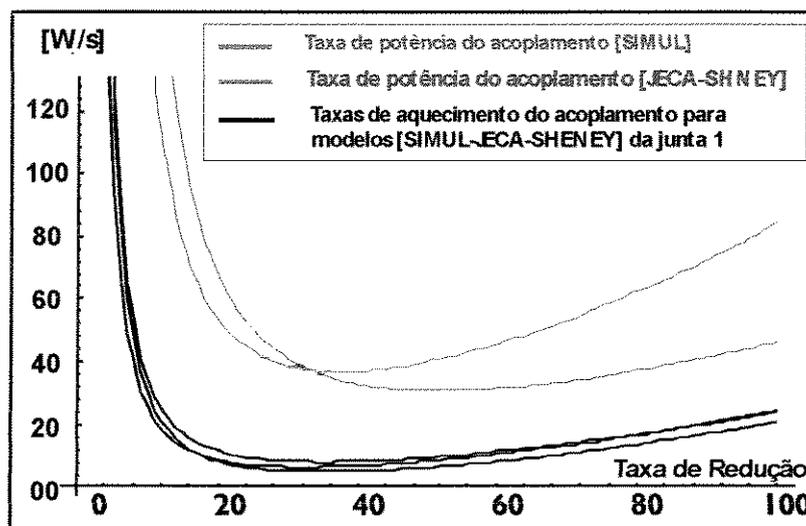


Figura 4.144: Comparação das taxas de potência e de aquecimento do acoplamento para as diversas estratégias de seleção de atuadores, **modelagem adaptativa e considerando os atuadores.**

Para os três casos apresentados, trabalha-se com a hipótese de acionamento indireto, e são traçadas as taxas de potências de acoplamento desenhadas em cor azul, para a estratégia SIMUL, e cor marrom para as outras estratégias, e as taxas de aquecimento do acoplamento, desenhadas em cor preta, veja gráficos na figura 4.144, para a primeira condição, figura 4.146 para a segunda condição e figura 4.148 para a terceira condição dinâmica.

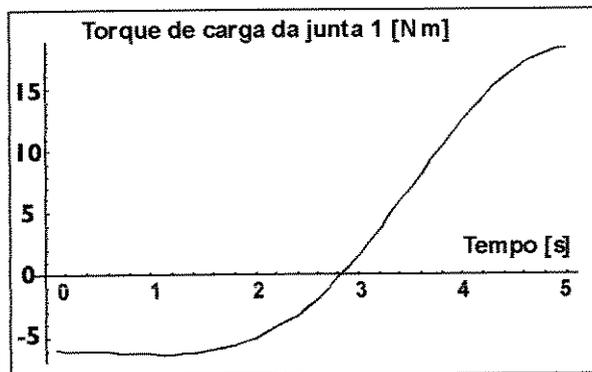


Figura 4.145: Torque de carga da junta 1, para modelo adaptativo e estrutura livre.

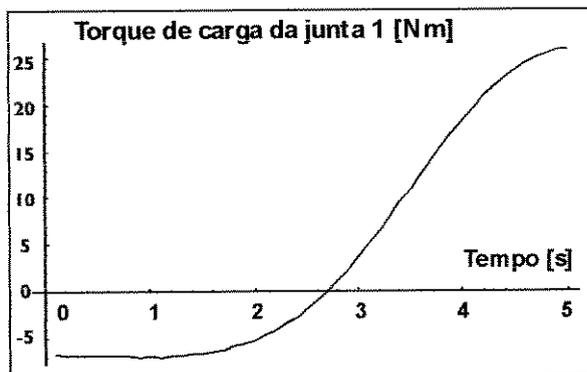


Figura 4.147) Torque de carga T_{ck} para a junta 1, usando modelo não adaptativo.

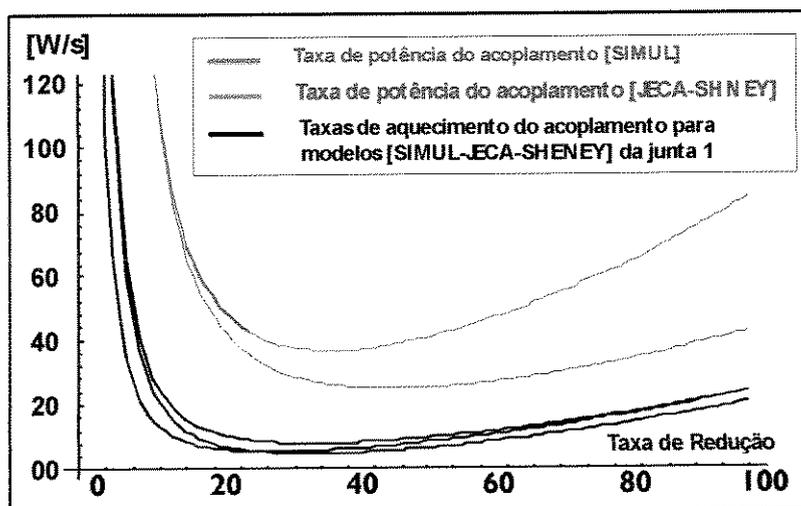


Figura 4.146: Comparação das taxas de potência e de aquecimento para acoplamento para diversas estratégias de seleção de atuadores, modelagem variante, para estrutura livre, pela taxa de redução.

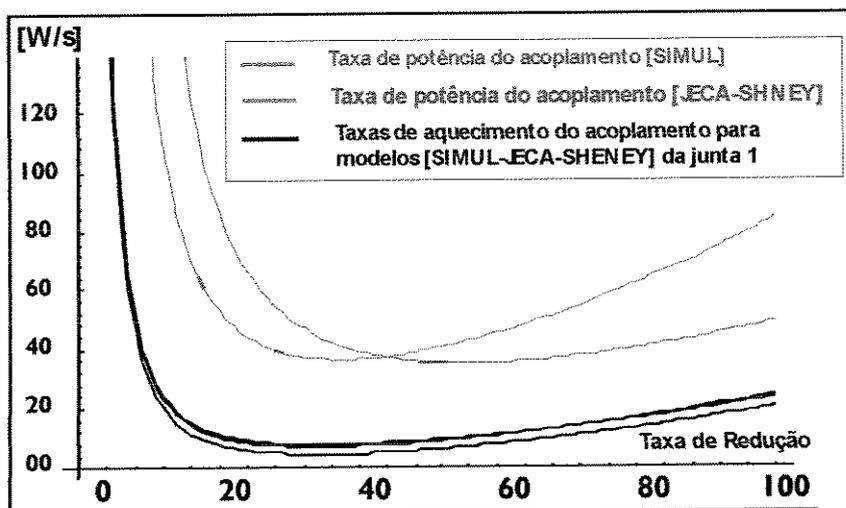


Figura 4.148: Comparação das taxas de potência e de aquecimento para acoplamento para diversas estratégias de seleção de atuadores, modelagem invariante, pela taxa de redução.

Observando-se as figuras 4.144, 4.146 e 4.148 pode-se verificar que as taxas de potências de acoplamento, comportam-se de modo pouco diferente entre as estratégias, exceto para a estratégia SIMUL, onde a taxa de potência do acoplamento se mostra significativamente reduzida em relação a cada uma das condições analisadas, indicando ser um estratégia mais recomendada que as demais, porque sua utilização evita o sobredimensionamento dos motores sendo a de menor custo. Já no critério da taxa de aquecimento, não há diferenças significativas para as condições e estratégias analisadas.

4.7 Parâmetros do Atuador (Motor DC) no Final do Processo.

Nas seções precedentes foram mostrados os parâmetros básicos e intermediários do processo de seleção de atuadores, que contribuem para a seleção dos atuadores em função da capacidade de potência e para a definição de alguns acessórios (como o redutor ou transmissão) do atuador principal (que pode ser um servomotor, servotuator hidráulico, ou outro).

Este trabalho é concentrado na aplicação motores de corrente contínua. Em decorrência desta opção, os parâmetros finais da seleção de atuadores terão primazia, são eles: a tensão média e a corrente será demandada nos terminais dos motores de cada uma das juntas. Suas definições são baseadas nos torques e velocidades, e alterações decorrentes da elevação de temperaturas, e enfim, de parâmetros elétricos, térmicos e dinâmicos.

Depois de mostradas as condições citadas acima numa subseção, será apresentada a resposta final do processo de seleção.

4.7.1 Perfis Eletrodinâmicos (Parâmetros Terminais do Processo de Seleção)

Os atuadores são os dispositivos que recebem energia externa, a converte em esforços e movimentos nas juntas dos manipuladores, para que em operações conjuntas, imprimam energia mecânica controlada na garra para executar tarefas, seguindo trajetórias e realizando esforços conforme exigências impostas a eles através de programação adequada.

Pelas razões expostas anteriormente, o primeiro aspecto a ser determinado no processo de seleção de atuadores de juntas robóticas, deve ser o torque que aquela junta requererá do sistema de acionamento local, o que requer a modelagem dinâmica do manipulador como foi discutido.

Seja o modelo de manipulador tipo (SSS-RRR-IDD-B23) da figura 4.27b cuja primeira junta é acionada indiretamente e as outras duas diretamente, as demais condições e características destes atuadores descritas através da tabela B.2, e os dados para simulação apresentados na listagem B.4. Então suponha que os atuadores de cada junta foram escolhidos, e que agora precisa-se determinar o sistema de acionamento local do motor de cada junta, a corrente e a tensão elétricas requeridas pela armadura, torque, velocidade, aceleração, temperaturas e o atrito do motor, e outros aspectos finais que serão discutidos na continuidade deste capítulo. Isto requer outra simulação do modelo dinâmico, adotando o motor e redutor que já foi escolhido.

Uma vez realizadas as simulações dos critérios preliminares que permitem a determinação do torque de carga mostrado na figura 4.149 para as três juntas do manipulador. Para dar uma noção mais realista dos parâmetros terminais, foi estimado também um torque de atrito que poderia ser visto pelo motor correspondente a 4% do torque de carga conforme sugerido e pelas razões indicadas na seção 3.3.1.1, que foi adicionado ao atrito viscoso como mostra a (figura 4.150). Assim o torque visto pelo motor para cada junta do manipulador assume as formas apresentadas na figura 4.151, onde o atrito desprezado na seção 3.3.1.1 aparece aqui por imposição gerando descontinuidade. A simulação deste

atrito segue as regras e modelos mostrados em [DUPONT, 93], [KARNOPP, 85], [SILVA, 98d], [WARATH, 84], [TIPLER, 78] e [GOGOUSIS, 85].

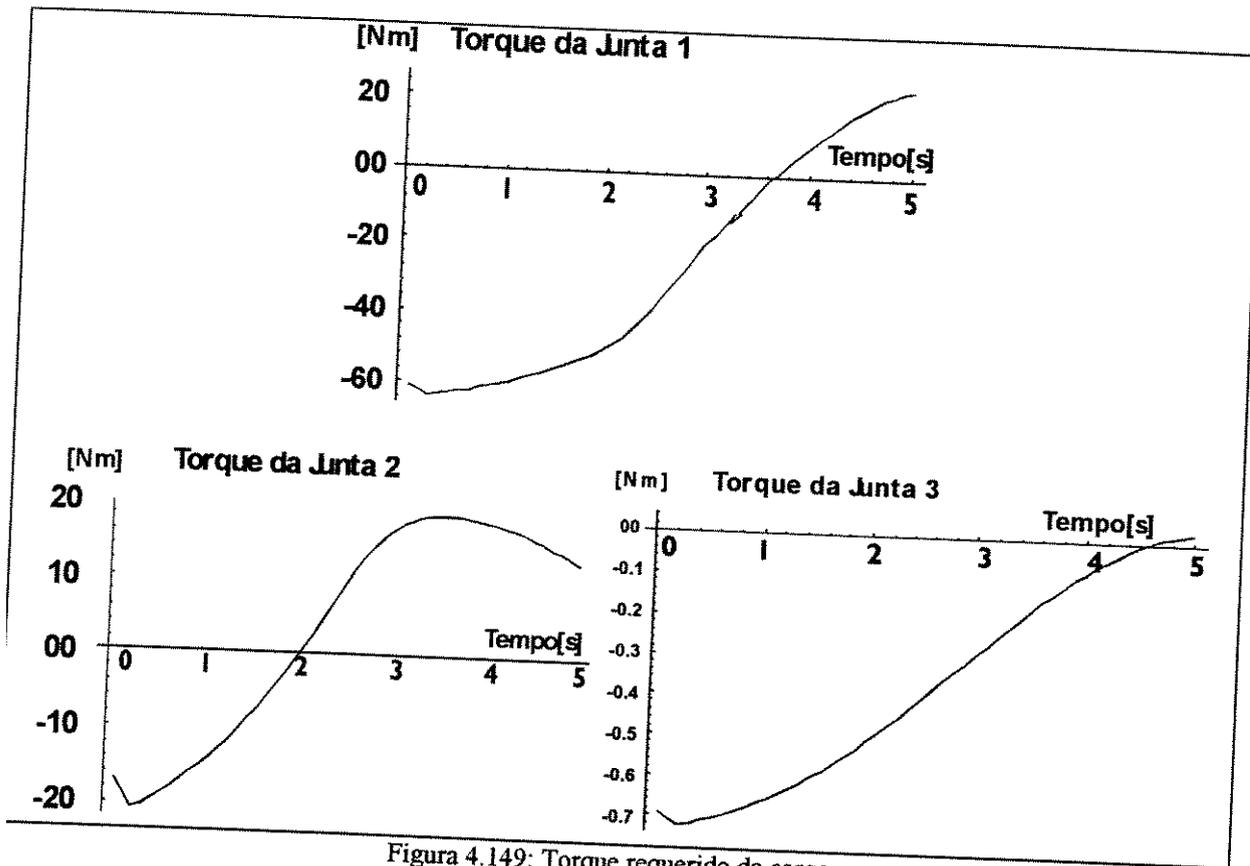


Figura 4.149: Torque requerido da carga.

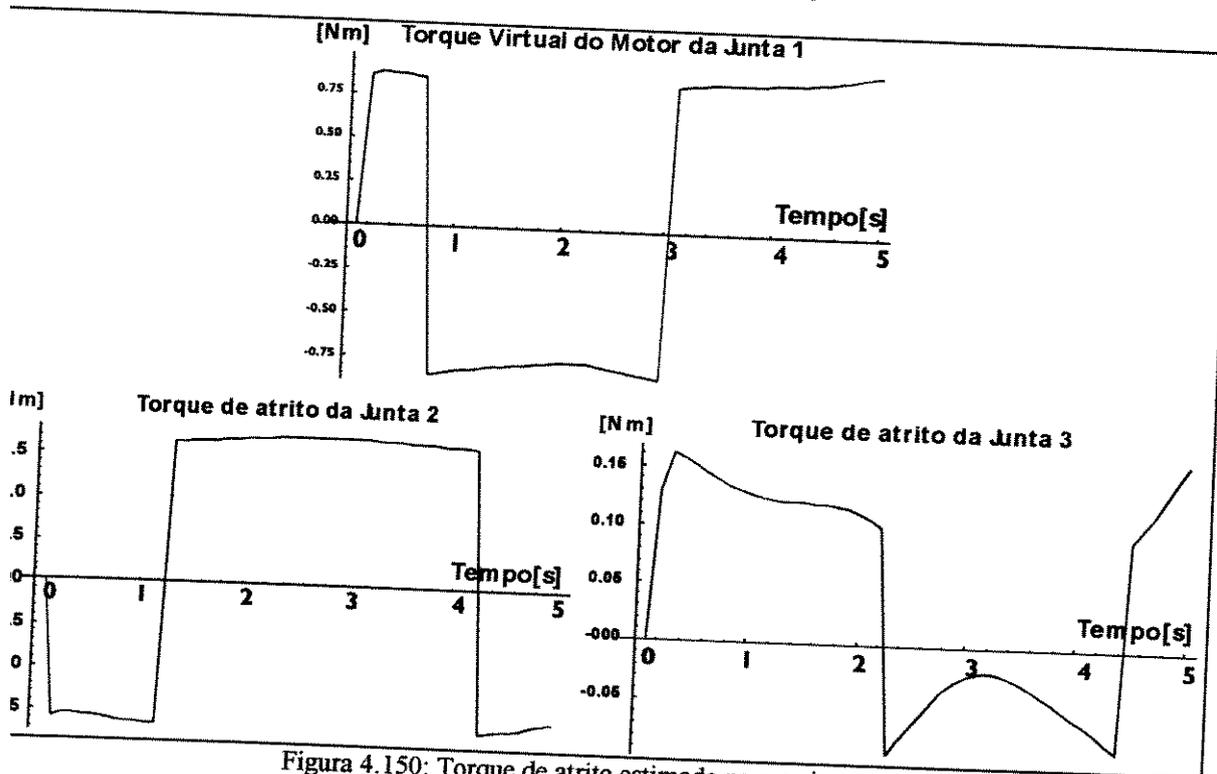


Figura 4.150: Torque de atrito estimado para as juntas.

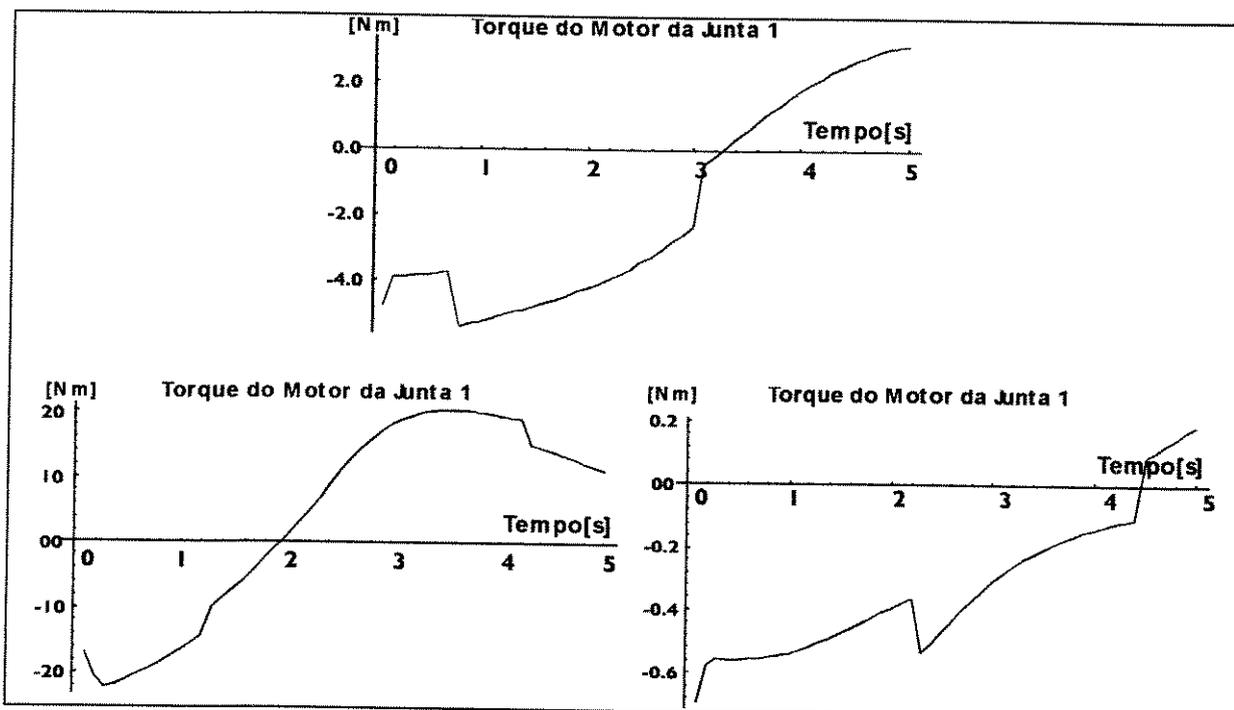


Figura 4.151: Torque eletromagnético exigido nos terminais do motor.

Uma vez conhecido o perfil de torque do motor fica fácil a determinação do perfil da corrente elétrica dos motores de cada junta, exemplificado na figura 4.152, pela simples razão entre o torque e a sensibilidade de torque do motor que é apresentada no catálogo de motores. Uma vez conhecido o perfil de corrente e de torque, pode-se determinar também seus valores médios e eficazes que são importantes para os passos seguintes. A determinação do torque de pico é importante para a determinação da queda de velocidade máxima em cada motor devido ao torque exigido pela carga.

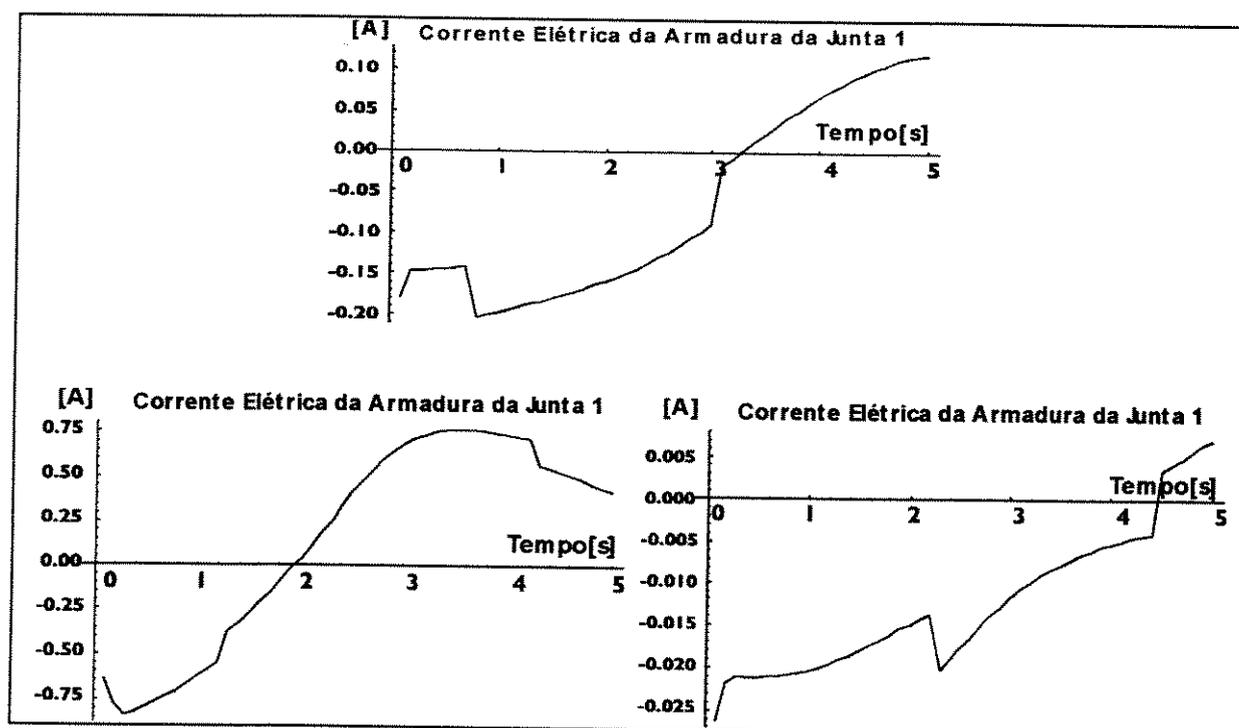


Figura 4.152: Corrente elétrica requerida dos terminais do motor.

A tensão nos terminais do motor, é determinada pela equação $V_m = R_a I_a + k_e N n_c$, ver a resposta de tensão para cada uma das juntas do modelo na figura 4.153, e a determinação deste modelo na seção 3.4.3.1. Estas figuras apresentam formas semelhantes. Antes de considerar o processo como encerrado é bom verificar se a velocidade da junta não extrapola a velocidade que o motor pode lhe impor apesar da queda de tensão na armadura, ou seja $n_c \leq n_{m_0} - R_a I_a / (k_e N)$.

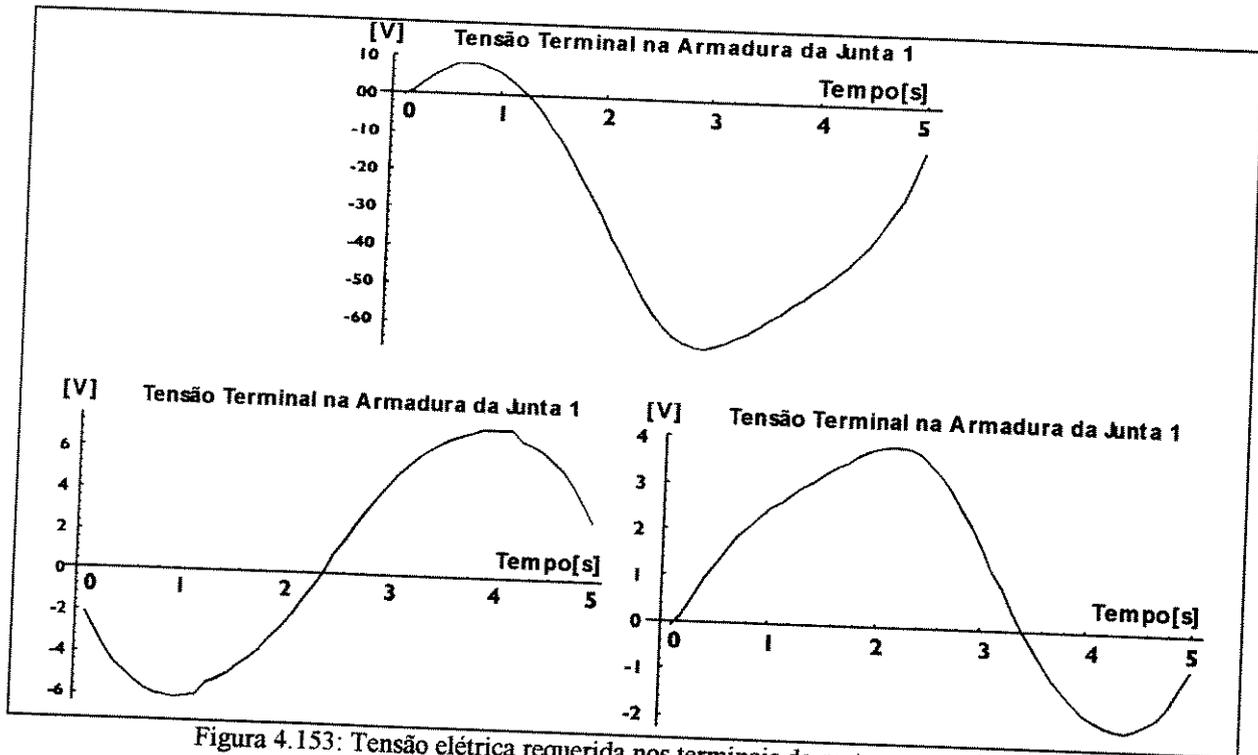


Figura 4.153: Tensão elétrica requerida nos terminais do motor para as juntas.

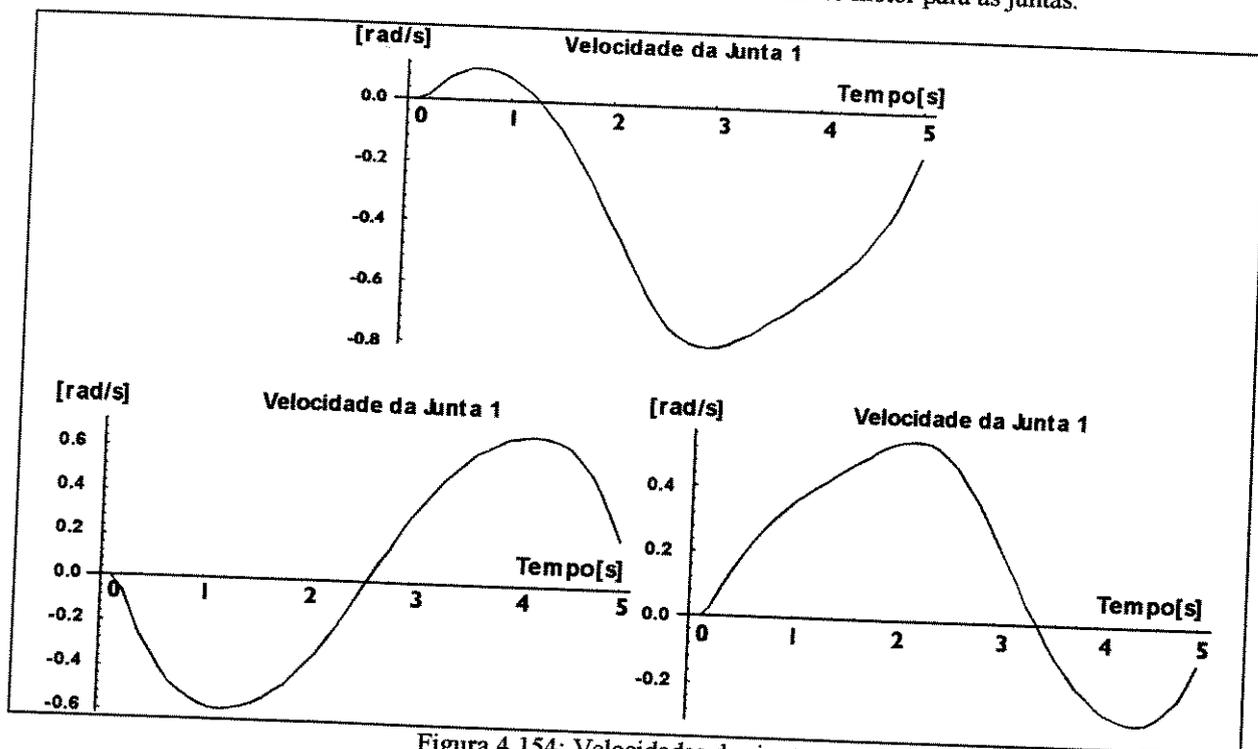


Figura 4.154: Velocidades das juntas.

Com estes gráficos apresentados nestas figuras, fecha-se o ciclo de análises e testes de motores para cada junta do manipulador restando o projeto do acionamento que deve ser assunto de outras pesquisas. Quando a partir dos parâmetros de cada uma das juntas e dos catálogos dos motores salvo em arquivo, através de análise técnica chegar-se a um consenso, for verificado que um destes motores atende as condições exigidas pela junta do manipulador através do seu operador, projetista, comprador, e/ou proprietário segundo os critérios estipulados, então o motor pode ser escolhido para aquela junta. Isto será mostrado na subseção seguinte, através da resposta do processo de seleção para o caso ilustrado aqui.

4.7.2 Soluções Finais

Após o encerramento do processo de seleção, o programa libera uma lista com as características de cada junta e dos seus motores e dos acessórios que o acompanham como redutor, ou transmissor na conformação do acionamento daquela junta. Antes de apresentar a resposta final, será apresentada a lista B.5 que contém as abreviaturas e nomes dos parâmetros arquivados nos catálogos a qual pode auxiliar na interpretação da resposta final.

Outro conjunto de informação que visa melhorar a compreensão da solução final é a tabela B.1 do anexo B, que contém as informações típicas de um motor. As características destes motores são reservadas em listas de ordem $(m \times p)$, onde m é o número de motores e p é o número de parâmetros característicos destes motores. Estas listas são geradas pelo programa ARPECAM e APECAR para pesquisas em arquivos de motores e redutores, respectivamente. Estes programas são compilados em linguagem C, mas eles armazenam dados também no padrão do ambiente MATHEMATICA™ onde são realizados os processos de seleção de atuadores e de modelagem dinâmica dos manipuladores.

Os parâmetros de ordem 36 a 41 da lista indicada na tabela B.2, são vetores cuja ordem encontra-se na linha 35, conforme a tolerância, veja [DC MOTOR, 73]. Os símbolos de identificação apresentados nesta tabela, são variáveis que contém a ordem do respectivo parâmetro mostrado na linha. O acesso a um certo parâmetro, como por exemplo, a massa do rotor cujo índice é $mr=2$, do motor cujo índice é $m=4$, é feito pelo comando `<<catálogo(m,mr)`, onde catálogo é o nome do arquivo consultado. Se no entanto este parâmetro for aqueles de ordem 36 a 41, da tabela B.2, por exemplo, a resistência para o nível de tensão de ordem 3, então o comando que deveria ser dado para recuperação deste parâmetro é `<<catálogo(m,rm,2)`.

A solução final exemplar do processo de seleção de atuadores para o manipulador planar de três graus de liberdade adotado como exemplo neste capítulo e indicado na figura 4.27b, é apresentada na tabela 4.20. Pode ser verificado, que nas linhas 36 a 41 existe um único elemento, ao contrário da tabela B.2. Isto ocorre porque o programa encontrou a tolerância e nível de tensão melhores, definindo um único valor para estes parâmetros do motor, uma vez que o nível de tensão ideal foi escolhido. Neste caso, a linha 35 apresenta a tolerância ideal recomendada para operação daquele motor para aquela junta, e na linha 25 é identificado o número do motor no catálogo arquivado.

Muitos dos parâmetros contidos nesta tabela são simbólicos pois depende de ensaios e testes e medição nos motores, como as massas, centros de massas e momentos de inércias dos rotores, e estatores; outros precisam de levantamento, como o custo; outros foram recalculados, com base nos parâmetros existentes nos catálogos ou medidos em laboratório, como é o caso das taxas de potência máxima, taxas de aquecimento máxima, e a própria potência máxima do motor, que geralmente não são definidas pelos catálogos utilizados, onde pelo menos um destes parâmetros não foi encontrado, mesmo porque no caso da determinação da taxa de aquecimento máxima, precisa-se da temperatura máxima do ambiente onde o motor será instalado e operar.

Ordem	Parâmetro	Na junta 1	Na junta 2	Na junta 3	Unidade no SI
01	TorqNom	6.54	6.54	6.54	Nm
02	TorqMax	21.120001	41.34	234.	Nm
03	MasRot	0.173	0.173	0.173	g
04	CeMasRx	0.023	0.023	0.023	m
05	CeMasRy	0.023	0.023	0.023	m
06	CeMasRz	0.023	0.023	0.023	m
07	JeixoR	1.53	1.53	1.53	Nm .s ² /rad
08	JnercRx	0.0987	0.0987	0.0987	Nm .s ² /rad
09	JnercRy	0.0987	0.0987	0.0987	Nm .s ² /rad
10	JnercRz	0.567	0.567	0.567	Nm .s ² /rad
11	AcelNom	0.123	0.123	0.123	rad/s ²
12	AcelMax	3100.	3100.	3100.	rad/s ²
13	VelNom	0.321	0.321	0.321	rad/s
14	VelMax	11.3	11.3	11.3	rad/s
15	PotNom	123.760002	123.760002	123.760002	W
16	PotMax	134.979996	134.979996	134.979996	W
17	TxPtNom	340.890625	5000.890625	123.890625	W/s
18	TxPtmax	400.0001	800.00001	200.0001	W/s
19	CapTeRt	0.9876	0.9876	0.9876	W.s ^o C
20	coefTR	0.00876	0.00876	0.00876	m ³ /C
21	RenNom	0.987	0.987	0.987	—
22	ViscMot	288.125	288.125	288.125	Nm.s/rad
23	TempNom	64.	64.	64.	°C
24	TempMax	75.	75.	75.	°C
25	NroMot	4	5	1	—
26	Torqbl	23.	23.	23.	Nm
27	MasEst	0.345	0.345	0.345	g
28	CeMasEx	0.123	0.123	0.123	m
29	CeMasEy	1.	1.	1.	m
30	CeMasEz	1.	1.	1.	m
31	JeixoE	2.244	2.244	2.244	Nm .s ² /rad
32	JnercEx	1.	1.	1.	Nm .s ² /rad
33	JnercEy	1.	1.	1.	Nm .s ² /rad
34	JnercEz	1.	1.	1.	Nm .s ² /rad
35	NroTaps	6.	2.	1.	—
36	ResArm	8.2	1.3	0.9	Ω
37	LaArmad	16.	2.3	1.7	mH
38	CorMax	8.7	22.6	26.799999	A
39	TenMax	71.300003	29.4	24.1	V
40	Kfcm	400.	45.	10.	V.s/rad
41	Sentorq	554.	212.	179	Nm/A
42	CorNom	2.1223	2.1223	2.1223	A
43	CorCamp	1.	1.	1.	A
44	TenNom	1.	1.	1.	V
45	TenCamp	1.	1.	1.	V
46	RaioMax	0.23	0.23	0.23	Ω
47	LargMot	0.18	0.18	0.18	mH
48	CapTEst	1.	1.	1.	W.s ^o C
49	coefTE	1.	1.	1.	m ³ /C
50	Ktormec	1.	1.	1.	V.s ² /rad
51	KEleMot	1.	1.	1.	°C/W
52	U\$Motor	50.34	50.34	50.34	—
53	RefExtM	20.4012	20.4012	20.4012	—
54	Tipo de Junta	2(rot-indir)	1(rot dir)	1(rot dir)	TOTAL
55	Custo por Junta	2	1	1	4
56	Taxa de Redução	13 (12 - 15)	1	1	

Tabela 4.20) Parâmetros, resultantes no final do processo de seleção, por juntas do manipulador

No final do processo de seleção de atuadores são definidos alguns parâmetros característicos das juntas do manipulador, por exemplo, as faixas de taxas de acoplamento para os redutores que acompanham o motor, o tipo de acionamento definido para cada juntas e o custo por junta e total. Isto finalmente define o acionamento de cada junta. Resta a definição do amplificador, e controle da junta que não foram tratados aqui, mas que recebe respaldo para sua determinação nos parâmetros definidos neste processo.

4.8 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados resultados que comprovam as hipóteses levantadas no capítulo 1, sobre a influência estrutural dos atuadores na estrutura dos elos do manipulador independente da junta acionada por cada um deles, também mostra a influência da modelagem do manipulador, e os fatores dinâmicos que contribuem para a modificação do parâmetros da seleção dos atuadores de cada junta.

As soluções mostradas também respondem às sugestões de soluções para os problemas relacionados, eliminando ou diminuindo a maioria das incertezas existentes nas problemáticas levantadas no decorrer deste trabalho, fornecendo respaldo para as conclusões mais importantes deste trabalho, bem como para apresentar sugestões para futuros trabalhos na área de seleção de atuadores.

Uma característica distinta e vantajosa do processo de seleção de manipuladores, é a determinação dos valores exatos dos parâmetros de seleção de motor (figura 4.155), em se tratando do critério de determinação da capacidade de carga do motor para acionamento indireto. Isto é conseguido pela simulação dinâmica. Os demais autores consideram que o torque eletromagnético máximo ocorre que os máximos de todos os parâmetros que o determinam, ocorrem simultaneamente, o que não é verdade. Isto porque eles utilizam estes valores como condições iniciais para programação recursiva.

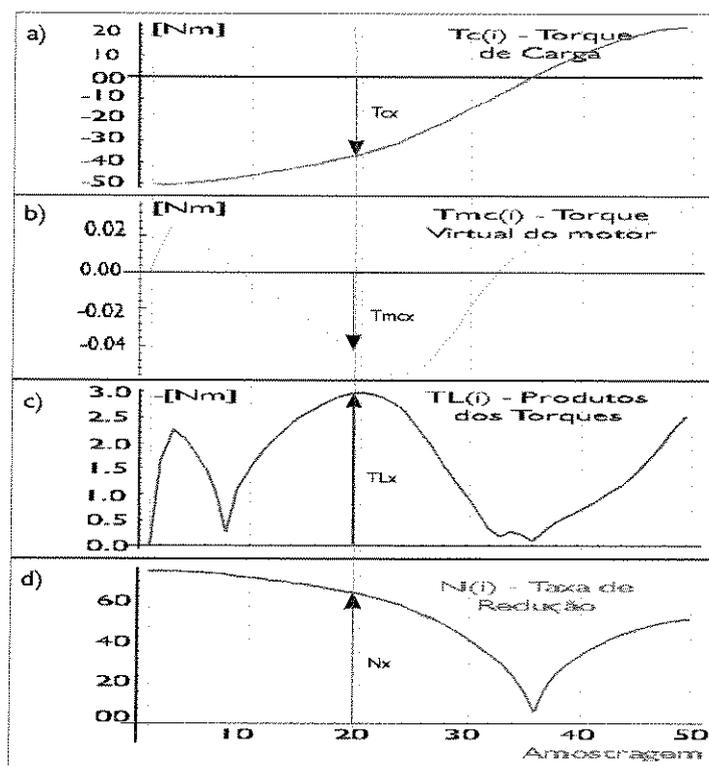


Figura 4.155: Parâmetros básicos para o processo de seleção desta tese

A formulação introduzida neste trabalho, difere daquela sugerida por [PALHARES 94] ou [SILVA, 98b] porque ao invés de utilizar uma técnica **recursiva** que culmina na definição de uma **única solução** para a taxa de acoplamento, usou-se uma técnica **iterativa** para determinar **faixas de taxas de redução**, cada uma conforme um critério de seleção adotado para análise de juntas com acionamento reduzido.

Simultaneamente foi elaborada uma programação computacional para modelagem cinemática e dinâmica (seções 2.5 e 2.3), para caracterizar os esforços típicos de um manipulador robótico industrial, sendo sensível a alterações cinemáticas e dinâmicas da carga da garra, a várias formas e localizações de tarefas no volume de trabalho, a distribuição dos atuadores na estrutura, e vários tipos de manipuladores. Esta programação de apoio foi elaborada em **TURBO-C™**, usando sistema operacional **DOS™**, pois não é o mais essencial da programação, pois resolve os problemas cinemáticos básicos e auxilia na definição, conformação e entrada dos parâmetros, do manipulador, da tarefa, e do tipo de acionamento, bem como da geração dos arquivos ou bancos dados contendo as características dos atuadores, dando suporte para a modelagem que é realizada no padrão do ambiente **MATHEMATICA™**.

A programação principal é desenvolvida em ambiente **MATHEMATICA™** e sua função, está relacionada com a **determinação do modelo dinâmico e remodelagem dinâmica algébrica ou numérica dos manipuladores, por Euler-Lagrange**, sempre que o atuador de uma junta é escolhido, se tornado um modelo adaptativo, no momento de efetuar e reproduzir os parâmetros da seleção de atuadores, o que se torna uma característica vantajosa, inédita e particular do processo de seleção de atuadores para manipuladores, como o que foi introduzido neste trabalho.

A principal vantagem do uso do aplicativo **MATHEMATICA™**, é que ele contém as **diversas funções e operadores matemáticos prontos em bibliotecas apropriadas**, que são indispensáveis para o processo de seleção, economizando o tempo do programador na elaboração da programação.

Uma vantagem inédita deste trabalho de seleção de atuadores, é a programação principal, construída em ambiente **MATHEMATICA™** para o sistema operacional **WINDOWS™**, **sem o compromisso de conhecimento de programação para sistema WINDOWS™**, porque a versão do **MATHEMATICA™** empregada, funciona neste sistema operacional e tem janelas de entrada de parâmetros e saída de gráficas próprias, dispensando a preocupação com a sintaxe própria do **WINDOWS™** para a construção delas. Isto também dá uma característica especial a este processo de seleção de atuadores, pois não encontrou-se uma descrição de outra referência bibliográfica que use este ambiente para fazer seleção de atuadores.

Há basicamente **quatro desvantagens** de se usar o aplicativo **MATHEMATICA™**:

1. a **dependência do ambiente MATHEMATICA™**, que pode aumentar o custo da programação.
2. a **quantidade de memória usada**, que muitas vezes é limitada, e portanto, **trunca a execução do programa dependendo do grau de complexidade do sistema robótico analisado**.
3. a **necessidade de se digitar instruções específicas**, via teclado, seguindo as normas do ambiente **MATHEMATICA™**, assim como a ordem de execução.
4. a **localização dos arquivos que devem estar sempre no diretório do aplicativo**, para que seja executada, embora não se tenha sido experimentado, uma alteração do arquivo (*init.m*), o que poderia mudar esta realidade. Estas características associadas, poderiam dificultar a

comercialização deste programa de seleção de atuadores, daí fica aqui a sugestão para a construção de um outro programa com independência para funcionamento, e que seja mais completo.

Foram deduzidas equações que distinguem os parâmetros básicos dos motores, da carga ou junta; parâmetros intermediários do processo que terminam com a obtenção dos atuadores; e uma prévia do comportamento dos parâmetros terminais dos atuadores e suas respectivas juntas.

Foram definidos e simulados quatro critérios de seleção de atuadores diferentes, caracterizados por diferentes considerações nos modelos dinâmicos das junta, visando determinação e tratamento dos parâmetros do processo que levaram a determinação de redutores e motores com parâmetros diferentes.

Foram obtidos resultados comparando-se a utilização da programação para modelagem dinâmica do manipulador desenvolvida neste trabalho, com um modelo dinâmico predeterminado, não adaptativo, que depende exclusivamente da massa e do comprimento dos elos, e que contém o centro de massas da estrutura definido num ponto fixo. O primeiro modelo é adaptativo com o processo de seleção de atuadores, incorpora as estruturas dos atuadores de uma junta ao modelo dinâmico sempre que é feita a escolha do atuador para cada junta, a partir da garra para a base. Isto é uma característica exclusiva do processo de seleção de atuadores para as juntas de um manipulador simulado nesta tese (programa de adaptação na seção 2.9).

Foram produzidas respostas através de simulações que mostram que a modelagem dinâmica de manipuladores pelas equações de Euler-Lagrange desenvolvida neste trabalho é válida. Neste caso, foram produzidas condições semelhantes a algumas da bibliografia e verificou-se que as respostas da modelagem desenvolvida neste trabalho são também semelhantes, tanto para a modelagem dinâmica algébrica [SPONG 89], quanto para as respostas no tempo [LATRE 94] para os modelos e condições conhecidas, que são de até três graus de liberdade, e espera-se que as respostas sejam válidas para robôs com mais graus de liberdade, veja neste e no capítulos 2.

Os parâmetros usados na seleção de atuadores dependem fortemente dos valores de pico, médios e eficazes dos esforços das juntas, que são calculados através da modelagem dinâmica e das imposições das tarefas que é sensível a alguns fatores característicos, mostrados neste capítulo e que são os seguintes:

1. Posições das coordenadas dos atuadores (motores e acessórios) na estrutura de cada elo do manipulador, o que mostra que as estruturas dos atuadores podem ser usados para fazer a compensação dinâmica estática dos elos, veja seção 4.3.1.2.
2. Tipos de acionamento de juntas, que implica na distribuição de diferentes combinações de atuadores e seus acessórios na estrutura do manipulador, bem como na visão dinâmica, ver figura 4.156, pela simulação das configurações do modelo da figura 1.2, veja também seção 4.3.2
3. Algoritmo cinemático usado para impor, ou determinar a aceleração e velocidade na garra do manipulador durante a tarefa desejada, veja seção 4.3.3.
4. Algoritmo cinemático, imposto na junta visando a otimização do consumo de energia na execução da tarefa imposta ao manipulador, veja seção 4.5.1.
5. Localizações das coordenadas dos centros de massas da estrutura isolada de cada elo do manipulador, veja seção 4.3.1.
6. Variância ou adaptabilidade do modelo dinâmico usado, o qual pode considerar ou ignorar certas grandezas estruturais dos elos e dos atuadores, veja seção 4.2.2 e 4.3.6.

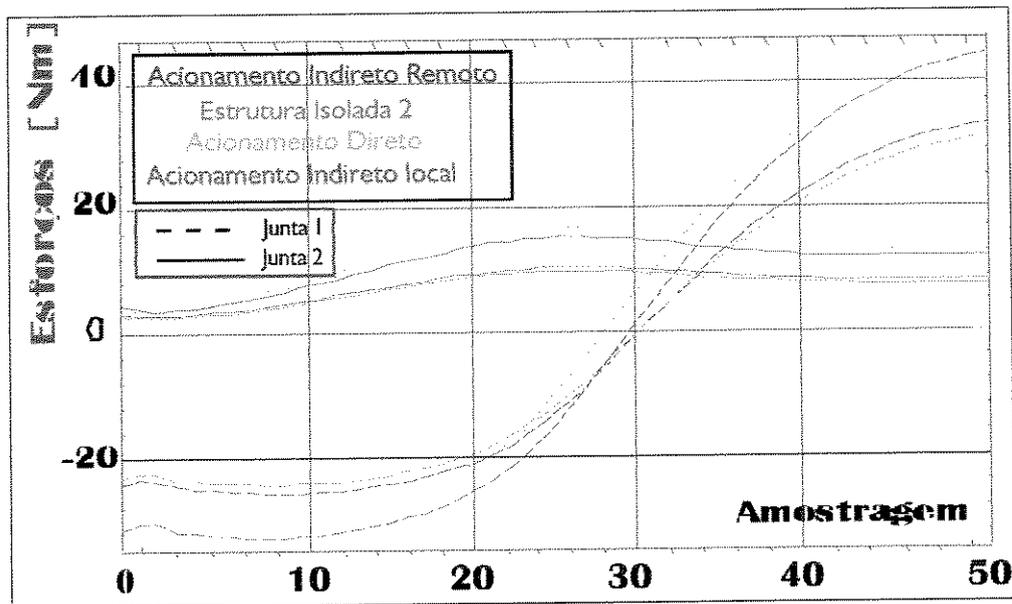


Figura 4.156: Respostas dinâmicas para configurações de acionamentos diferentes.

7. Dimensões da carga transportada pela garra, veja seção 4.3.7.
8. Compensação do desequilíbrio de massas em torno dos eixos dos elos, que mudam os esforços devido a aceleração da gravidade local, veja seção 4.3.1.1.
9. Tempo de execução da tarefa, veja seção 4.3.5.
10. Perfil de variação de tempo, veja seção 4.3.4b.

O processo final de seleção de atuadores termina com um passo que poderia ser importante para o comprador, ou proprietário do manipulador, o que é a determinação do **custo dos atuadores por elo**, e o **custo total**. Isto pode servir também como um critério para a escolha do atuador, que pode ser interrompido ou não, até que se chegue a um valor que satisfaz, ou pode prosseguir até que sejam investigados entre todos os motores do catálogo selecionando, e encontrado somente um ou uma faixa dos melhores.

O acionamento de manipuladores ainda que por juntas isoladas, em geral difere do acionamento de uma linha de produção, principalmente se este manipulador tem juntas rotacionais ou não prismáticas. Isto faz diferença em termos de optar pela imposição de algoritmos de definição das velocidades das juntas, quando se está interessado na otimização do consumo de energia no acionamento das juntas do manipulador. Ocorre que controla-se as velocidades das juntas, mas apesar de se garantir que a garra vá de uma posição a outra com um consumo menor, ela não vai pelo menor caminho, a reta que liga os dois pontos inicial à final do trajeto. Além disto, a carga de uma junta robótica com juntas rotacionais como discutido na seção 4.5 não é constante, o que não justifica o emprego do critérios de **otimização do consumo de energia para juntas acionadas por motores utilizando movimento incremental**, como foi aplicado para outros casos da bibliografia, veja [TZINADLOVSKI, 88] e [DC MOTOR, 73].

Capítulo 5:

Conclusões, e Propostas de Temas de Pesquisas Relacionados ao Assunto

O objetivo principal deste trabalho foi construir uma programação que permitisse dominar todo o processo de seleção de atuadores para manipuladores, e que levasse em consideração as alterações inerentes das operações e tarefas dos manipuladores, baseado na simulação cinemática e dinâmica, e em listas informatizadas de atuadores motores e redutores, tudo conforme estabelecido no capítulo 1. Este trabalho foi dividido em cinco capítulos onde foram abrangidos os seguintes pontos:

1. Apresentação da problema proposto, metas e metodologias utilizadas no processo de seleção de atuadores para manipuladores
2. Estudo da modelagem cinemática e dinâmica, identificação, classificação e geração de trajetórias em manipuladores.
3. Análise de critérios utilizados para seleção de atuadores, e da classificação e identificação dos tipos de atuadores utilizados ou potencialmente indicados para acionar direta e indiretamente, as juntas de manipuladores robóticos.
4. Elaboração de dois grupos de programas computacionais. Um para dar auxílio fundamental e apoio e outro especializado para executar o processo de seleção de atuadores propriamente dito.

A partir disso, desenvolveu-se uma nomenclatura que engloba uma nova forma de **classificação de manipuladores**, que considera o número de juntas, o tipo de acionamento, de articulação das juntas e do manipulador, e a posição relativa do atuador primário ou motor (seção 2.2).

Elaborou-se uma lista bibliográfica, e construiu-se alguns diagramas que sugerem uma classificação de atuadores, conforme os princípios de funcionamento, forma de atuação, e que visa ajudar no processo de escolha do tipo dos atuadores, na fase de projeto e conforme as necessidades dos manipuladores desejados, (seção 3.2, e anexo A.1).

A importância de **projetar o robô e escolher o motor** de melhor aproveitamento e menor custo, **simultaneamente**, é uma das preocupações importantes mostradas neste trabalho, pois as ações que visam otimizar somente um aspecto técnico podem ser canceladas pela não otimização do outro, aplicando numa ineficiência de projeto, (seções 2.8 e 2.10).

A forma de encarar a estrutura do manipulador, a **interação** entre as estruturas do manipulador e as estruturas dos atuadores e seus acessórios influi na escolha do manipulador e o processo de seleção apresentado neste trabalho distingue os **tipos de acionamentos**, e define algoritmos diferentes para acionamento reduzidos e não reduzidos, (seções 3.4 e 3.5).

5.1 Análise dos Programas Computacionais Desenvolvidos

Foram feitos dois programas computacionais neste trabalho, um principal e outro de apoio. O segundo programa auxilia e caracteriza o processo manipulador (veja o anexo A), e o programa principal determina o modelo dinâmico dos manipuladores rígidos, conforme estabelecido no capítulo 2, e faz a seleção de atuadores conforme os critérios definidos no capítulo 3.

O **programa de apoio** simula diversos manipuladores rígidos imaginários, de até três graus de liberdade, e satisfaz as condições sugeridas no capítulo 1, simula-os cinematicamente, definindo o projeto destes manipuladores rígidos básicos de diversos tipos, determinando os perfis cinemáticos, para que este manipulador execute tarefas, sustentando cargas, e seguindo trajetórias com velocidades específicas, servindo de apoio para as análises da eficiência do manipulador, para que o senhor X, escolha, compre ou analise um destes manipuladores para executar sua tarefa.

Este programa dá liberdade para o comprador optar pela configuração que melhor satisfaz as condições de carga e requerimento técnicos de sua tarefa. Ele também incorpora os atuadores e seus acessórios na estrutura dos manipuladores, e define os pontos e as formas de encaixe de cada equipamento, conforme padrão da modularidade. Ele permite também a aquisição dos parâmetros dos atuadores bem como facilita e sugere a definição e aquisição destes, e organizando-os em catálogos, conforme o padrão de utilização. Este banco de dados pode ser acessado pelo processo ou usuário e seus dados podem ser pesquisados ou modificados pelo programador.

A **primeira parte do programa principal** gera o processo completo, esquematizado no diagrama, permitindo uma análise dinâmica das condições de um manipulador e a seleção de atuadores, cujas características, são obtidas através de dois bancos de dados, um primeiro que descreve o desempenho cinemático das juntas para a realização da tarefa e outro que contém informações sobre a distribuição dos atuadores na cadeia do manipulador, conforme tipo de acionamento de cada junta ou necessidades técnicas, os parâmetros estruturais e as condições de operações como a influência da aceleração da gravidade, e temperatura ambiente máxima do meio de operação do manipulador, além dos parâmetros estruturais da carga suportada pela garra na execução da tarefa. Este programa produz um modelo que é sensível a muitas características dinâmicas, cinemática e técnica do manipulador, influenciando diretamente no processo de seleção de atuadores que se mostra sensível a estas grandezas e a estrutura dos próprios atuadores.

A **segunda parte do programa principal**, depois de corrigidos os erros dos processos tradicionais considerando a estrutura dos atuadores e seus acessórios integrados a estrutura dos elos dos manipuladores, assimila os critérios de seleção de atuadores apresentados por [SHNEYDOR 89], para as juntas robóticas cujos modelos são adaptativos, sugerindo uma modificação inédita no critério da determinação do torque ou taxa de potência mínima do acoplamento para acionamento indireto, e introduz e simula a idéia de seleção de atuadores para acionamento direto para juntas de manipuladores, usando os mesmos critérios, e obtendo um equacionamento diferente, o que parece inédito, uma vez que não se encontrou nenhum outro artigo sobre o assunto.

5.2 Conclusões sobre as Técnicas de Seleção de Atuadores Introduzida nesta Tese:

- ☞ É integrada ao modelo dinâmico adaptativo em função da distribuição de atuadores nas estruturas dos elos, que variam conforme a configuração geométrica do manipulador, e conforme o atuador que estiver sendo avaliado para uma determinada junta, a tornado distinta de todos os outros exemplos citados na bibliografia.
- ☞ Ela integra as estruturas dos atuadores, e de seus acessórios geometricamente, respectivamente, em todos os elos do manipulador nos quais se encontram fixados, através da realização do processo de seleção dos atuadores de cada junta, que ocorre da garra para a base simplificando o processo de seleção de atuadores.
- ☞ O diagrama final do processo de seleção de atuadores indicando as principais transformações tem a forma apresentada na figura 5.1, e mostra as características marcantes do processo, que são a definição e modelagem das tarefas, das configurações de acionamentos e dos tipos de manipuladores pretendidos. Em seguida vem a organização estrutural, modelagem dinâmica da estrutura inicial, a incorporação de cada atuador avaliado na estrutura dos elos, a remodelagem, definição do catálogo de atuadores e pesquisa sobre ele durante o processo de seleção das juntas que ocorre da garra para a base.

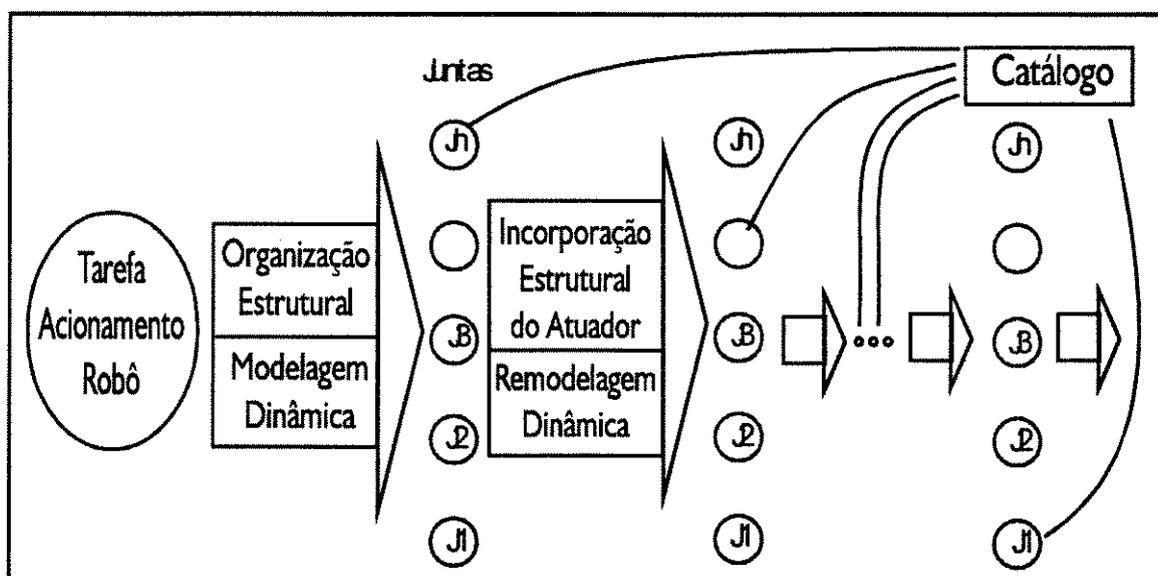


Figura 5.1: Diagrama final do processo de seleção de atuadores integrado à modelagem dinâmica de manipuladores industriais.

- ☞ Este trabalho lida com a simulação do modelo dinâmico, permitindo o conhecimento exato do torque de pico do motor, enquanto em [SHNEYDOR, 89] o torque de pico é calculado aplicando-se na equação do torque total, os valores de picos dos parâmetros daquela equação considerando que os mesmos ocorrem simultaneamente, o que pode não ser verdade superestimando o valor do torque de pico e conseqüentemente a taxa de potência, que é um dos parâmetros que define um dos mais importantes critérios do processo de

seleção de atuadores, implicando na escolha de motores de maior taxa de potência, e desprezando outros menores que poderiam servir para acionar aquela determinada junta.

- ☞ Como a técnica sugerida em [BADAN PALHARES, 94], as técnicas apresentadas aqui são mais genéricas e portanto aplicadas também para manipuladores industriais, onde os momentos de inércias variam com a configuração do manipulador, enquanto o processo de [SHNEYDOR, 98] é específico para cargas constantes, ou modelos invariantes.
- ☞ Sugere, apresenta e simula uma técnica de **seleção de atuadores de juntas com acionamento direto** com base semelhante àquela da técnica de seleção de atuadores aplicada no acionamento indireto, enquanto os demais autores citados [SHNEYDOR, 98], [POTCONJAK 89] e [SEERING 94] não tiveram a preocupação como isto, porque ela parece estar embutida dentro da seleção de atuadores para as juntas acionada indiretamente. Assim, foi feita uma análise matemática sobre este assunto caracterizando que apesar de empregar os mesmos princípios, apresenta uma formulação distinta e com características inéditas.
- ☞ No cálculo da taxa de aquecimento que influencia na escolha dos atuadores, considera-se os fatores ambientais, tais como, a refrigeração da armadura do motor e a diminuição da temperatura máxima do ambiente em torno do dele, o que é sustentado pelas equações do capítulo 3, gráficos do capítulo 4.
- ☞ As demonstrações do processo de seleção de atuadores implementado aqui, utilizaram sempre um modelo de robô planar, mas o programa desenvolvido nesta tese tem a capacidade de resolver as equações dinâmicas e selecionar atuadores também para manipuladores espaciais ou tridimensionais. Entretanto a utilização do mesmo requer que o interessado produza um banco de dados sobre o modelo de seu interesse no formato e padrão específico do programa desenvolvido em ambiente MATHEMATICA™.
- ☞ A metodologia proposta neste documento, é multidisciplinar, sendo apresentada de modo didático e objetivo, podendo servir como um manual de referência, que contribui para a compreensão da teoria de manipuladores robóticos, e permitindo o desenvolvimento de outros trabalhos na área.
- ☞ O processo de seleção de atuadores definido neste trabalho, tem a característica interessante e que é uma tendência atual de integrar numa só programação múltiplos programas, sistemas operacionais, aplicativos e linguagens diferentes, tirando proveito das características de cada um deles. A programação e domínio da linguagem C++, que permite a elaboração de rotinas para comunicação entre os ambientes, o sistema WINDOWS™, que permite um domínio das funções gráficas com boa resolução, e o Aplicativo MATHEMATICA™, que contém funções matemáticas algébricas e matriciais prontas que facilita a elaboração do programa de modelagem dinâmica e cálculo vetorial dispensando a construção de outras funções.
- ☞ A elaboração de um programa de seleção de atuadores para manipuladores em ambiente WINDOWS™, parece inédita no BRASIL se mostrando vantajosa, e um pouco excêntrica baseado nas pesquisas feitas até aqui para sustentar este trabalho.

5.3 Perspectivas Futuras

Os seguintes temas de pesquisas relacionados a este trabalho de tese, podem ser propostos para trabalhos futuros:

- ☞ A partir dos critérios analisados, sugerimos o desenvolvimento de um novo *software aplicativo comercial* do tipo dedicado ao processo de seleção de atuadores para manipuladores industriais, e que considera as inovações técnicas propostas nesta tese.
- ☞ O estudo das técnicas de seleção de atuadores para manipuladores prático, deve levar em conta as inúmeras aplicações e tarefas que um manipulador executa, e também os diversos níveis de esforços requeridos por um manipulador. Considerando que os diversos tipos de tarefas e aplicações de manipuladores podem requerer diversos níveis de esforços diferentes e portanto exigir um manipulador com capacidade diferente para cada um destes níveis, recomendamos a **implementação** de um laboratório, com variado conjunto de tipos e dimensões de motores e redutores, e pelo menos um **robô modular** que permita a análise prática, e a comparação dos resultados obtidos em simulação para diversas condições.
- ☞ Uma vez que os modelos dos atuadores estudados neste trabalho são analisados para analisar juntas rotacionais, e que as condições estudadas com relação à minimização do consumo de energia apresentados em outros trabalhos não se aplicam ao caso das juntas rotacionais que apresentam comportamento não linear. Sugerimos que seja feita uma pesquisa com uma análise mais profunda e específica sobre a **otimização do consumo de energia para utilização de motores com movimentos incrementais** em juntas rotacionais que têm comportamento não linear. Isto é justificado porque se trata de uma questão está relacionada com a redução de consumo de energia, que por sua vez está ligado com as questões de preservações do meio ambiente, e dificuldades financeiras do país oriundas do arrocho na economia nacional, causada também pela competitividade surgida com abertura do mercado visando a globalização do país.
- ☞ As dimensões dos dispositivos e partes materiais que integram um manipulador, representam cargas para os atuadores e influenciam na dinâmica dos sistemas robóticos e de suas juntas, e conseqüentemente do processo de seleção de atuadores. Por esta razão, sugerimos a realizações de pesquisas mais abrangentes sobre a otimização da estrutura dos manipuladores, investigando as dimensões e tipos de materiais, quanto a dureza e resistência mecânica para constituir os **elos e outros dispositivos como os redutores**.
- ☞ Nesta tese, encontra-se como resposta uma faixa de taxa de acoplamento aceitável para o acionamento para o processo de seleção de atuadores. A escolha da resposta final da taxa de acoplamento é feita por um critério meramente matemático, a média da faixa. Porém, acreditamos que pode haver um valor ou trecho dentro da resposta final que é melhor simultaneamente para todos os critérios. Logo sugerimos a realização de uma pesquisa com a finalidade de **investigar** esta hipótese, **definindo um refinamento mais criterioso** para a escolha da melhor taxa de acoplamento ou redução dentro da resposta final obtida para os diversos critérios discutidos neste trabalho.

- ☞ No processo de seleção estudado nesta tese, foi investigado e constatado a influência da alteração dos parâmetros geométricos com a modificação das configurações dos elos, tipos de acionamentos das juntas e verificação dos atuadores. Entretanto, depois do processo de seleção obtido com a realização do projeto do manipulador, estes parâmetros não mudam. Por outro lado, os elos podem possuir dispositivos que movimentam com as juntas, tais como: guias de cabos, fusos, roldanas, engrenagens, êmbolos, pistões e outros que modificam os parâmetros estruturais e a dinâmica do manipulador dinamicamente. Por isto, sugerimos aqui, a **realização de uma pesquisa que investigue as influências** da modificação dos parâmetros geométricos, tais como massa centro de massa e momento de inércia dos elos, na intensidade de esforços das juntas e portanto na capacidade dos motores e no seu processo de seleção, causadas pela movimentação dos dispositivos móveis localizados nas estruturas dos elos, devido às operações de movimentação para posicionamento e orientações do manipulador.

- ☞ As forças "fictícias" de coriolis e centrífugas, são usadas para explicar o comportamento de objetos em movimento não linear se movendo com velocidades e acelerações relativas entre si, como é o caso dos elos das cadeias cinemáticas dos manipuladores. Geralmente, os elos de manipuladores se movimentam com velocidades e acelerações relativamente baixas entre si, e resulta na existências de forças "fictícias" baixas ou até desprezíveis. Analisando agora os motores das juntas acionadas indiretamente, que ficam apoiados na estrutura de um determinado elo, pode-se dizer que eles movimentam-se com velocidade relativamente alta porque estes motores estão ficam antes dos seus redutores de velocidades, e se localizam na estrutura dos elos que geralmente tem uma velocidade relativamente baixa, se as velocidades e acelerações relativas entre elo e motor são consideráveis, então supomos que as forças fictícias produzidas entre estes dois é consideravelmente significativa, logo, é baseado nesta análise, que sugerimos como futuro trabalho uma investigação mais profunda e prática desta realidade.

Bibliografia

- ALVES, João Bosco M., Controle de Robô. Campinas: ed. Cartgraf Ltda, 1988. 185p.
- ANDRADE, Darizon Alves, Uma Contribuição para o estudo dos Motores de Passo, Departamento de Engenharia Eletrica, Universidade Federal de Uberlândia, 1988, cap. 3, Modelagem Matemática, p. 24-39, (Disertação: Mestrado em Engenharia Elétrica),
- ANDRADE, Darizon Alves, Uma Contribuição para o estudo dos Motores de Passo. Universidade Federal de Uberlândia, JIEE, 1987, p 146-156. Anexo: ANDRADE, D. A., AZEVEDO, H. R. Descrição e Análise da Operação de Motores de Passo, JIEE, v.8, 1987 p.3-13 (Disertação: Mestrado em Engenharia Elétrica)
- AOYAGI, Seiji, YOSHITOGU, kamiya, SAKIICHI, Okabe, Optimun Design Method for Sub Reed of an Ultrasonoc Motor. Journal of Robotics and Mechatronics, v.3, n.4, p.314-319, 1991.
- ARAUJO, Geraldo A., LIN, Liang C., Considerações Sobre projeto mecânico de Robôs Industriais. Jorn. Int. de Aut. Ind., São Paulo, v.1, n.4, p.8-10, Ago 1989.
- ARMSTRONG, Armstrong B, et al, The Explicit Dynamic Model and Inertial Parameters of the PUMA 560 Arm. Proceedings of the IEEE Int. Conf ou Robotics e Automation, 1986.
- BEDERSON, B. Benjamin, WALLACE, L., SCHWARTZ, Eric, A Miniature Pan-Tilt Actuator: The Spherical Pointeing Motor. IEEE Transaction on Robotics and Automation, v.10, n.3, Jun 1994.
- BEDERSON, B. Benjamin, WALLACE, L., SCHWARTZ, Eric, Control of A Spherical Pointeing Motor. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ROBOTICS AND AUTOMATION, 1993, Atlanta. Proceedings... Piscataway: IEEE, v.2, p.630 - 636, 1993, .
- CRAIG, John J., Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Addison-Wesley, 2ª ed. 1989, 450p.
- DC MOTORS Speed Control Servos Systems, an Engeneering Handbook. Hopkins: 2ª ed, Eletrocraft Co., 1973.
- DIRECT DRIVE, ed. Magnetic-Tecnology, Engennering Handbook, Canoga Park, California, USA
- DUPONT, Pierre E., The Effect of Friction on the Forward Dynamics Problem. The Intenational Journal of Robotics Researt, Vol. 12, n.2, April 1993. p 164 - 179.
- FRANCO, Sergio Nobre, Comandos Hidráulicos. SENAI-SP, São Paulo, 1987.
- GALHANO, Alexandra M. S. F., MACHADO, J. A. Tenrero, On the Analysis and Design of Robot Manipulators, A Statistical Approach. 11th IFAC Wold Congress, tallinn, USSR 1990.
- GOGOUSSIS, A., Donath, A., A Method for the Real Time Solution of the Forward Dynamics Problem for Robots Incorporating Friction, Transactions of the ASME, Journal Dvnamic Systems Control and Measurement., v.102, Dec., 1985. p.630 - 639.

- GROSSELIN, clemént M., LAVOIE, Eric, On the kinematic Design of Spherical Three-Degree-of-Freedom parallel Manipulators. The International Journal of Robotic Research, v.12, n.4, Aug. 1993, p 394 - 402.
- HALLIDAY, Robert, RESNICK, David. FÍSICA: Mecânica - Acustica - Calor. 4^ª ed. Rio de Janeiro, Livro Técnico S.A., 1970. v.2, p.705 - 1128. Cap 12, Dinâmica do Movimento de Rotação, e cap 13, Conservação da Quantidade de Momento Angular.
- HOLLIS, Ralph L., SALCUDEAN, E., ALLAN, Peter A, A Six-Degree-of-Freedom Magnetically Levitated Variable Compliance Fine-Motion Wrist: Design, Modeling, and Control. IEEE Trans. on Robotics and Automation, v.7, n.3, June 1991.
- IZAGUIRRE, A., PAUL, R. P, Automatic Generation of the Dynamics, Equations of the Robot Manipulators Using a LISP Program. Proceedings of the IEEE, International Conference on Robotics and Automations, IEEE, 1986
- KANEKO, K., YAMADA I., ITAO K., A Spherical DC Servo Motor With Three Degrees of Freedom. Transactions of the ASME, v.111, sep 1989. p.398-402.
- KARNOFF, Dean, Computer Simulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems. Transactions of the ASME, Journal Dynamic Systems Control and Measurement, v.107, Mach 1985. p.100 - 103.
- KHATIB, Oussama. A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation. IEEE Journal of Robotics and Automation, v.RA-3, n.1, p 43-53, Feb 1987.
- KURODA, Hidehiko, YAMAMOTO, F. et al, Positining Mechanism with Three Degrees of Freedom Using Piezoelectric Actuators. june 1991, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 3, n.4, 1991.
- LATRE, L. Gimeno, Modelagem e Controle de Posição de Robôs, SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, Controle e Automação, v.2, n.1, Mar 1988.
- LATRE, L. Gimeno, (Anotações de aula), Modelagem e Controle de Posição de Robôs, Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP, Campinas: 1992, 60p.
- LEE, C. S. Georges, CHEN, Chun Lung, Efficient Mapping Algorihms for Scheduling Robot Inverse Dynamics Computation on a Multiprocessor System. IEEE trans. on Systems, Man, and cybernetics, v.20, n.3, May/June 1990, p.582-595.
- LEE, Kok-Meng, VACHTSEVANOs, George, KWAN, ChiKong, Development of a Spherical Steper Wrist Motor. Proc. IEEE, Conf. Robotics and Automation, Philadelphia, 24-29 APR 1988.
- LEE, Kok-Meng, KWAN, Chi-Kong, Design Concept Development of a Spherical Steper for Robotic Applications. Proc. IEEE, Transactios on Robotics and Automation, v.7, February 1991.
- LEU, M. C., EMATI H, Automated Symbolic Derivation of Dynamic Equations of Motion for Robotic Manipulators. Transactions of the ASME p.172 - 179, vol. 108, september 1996.
- MACHADO, J. A. Tenreiro, GALHANO, Alexandra M. S. F., Statistical Modelling of Robotic Manipulators. Faculty of Engeneering of the Porto, Department of Eletrical and Computer Engennering, Dec. 1992.
- MACHADO, A., Tenreiro. (Apostila da palestra) Dinâmica e Controlo de Manipuladores Robóticos, Campinas: 1996, Departamento de Projetos Mecânicos da Universidade Estadual de Campinas, Intercâmbio entre o Laboratórios de Automação e Robótica do Depto de Projetos Mecânicos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas / Depto de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal: 1996, 39p.

- MADRID, Marconi Kolm, Controle de Trajetórias Contínuas por Seccionamento em Sub-Trajetórias usando Inteligência Artificial num Robô Multi-tarefas; Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP, 1994, 222p. (Tese, Doutorado em Engenharia Elétrica).
- MADRID, Marconi Kolm, Robôs Manipulador Mecânico TRRR para Posicionamento Espacial com Controle Digital Hierárquico a microprocessadores; Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP, 1988, 154p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Elétrica).
- MATLAB, Microsoft Windows-m, Dynamic System Simulation Software, Reference Guide, The MathWorks, Inc., 1ra ed, March 1992.
- MECHI, A., FUNABIKI, S., Step-up/down voltage PWM AC to DC convertor with one switching device, IEE PROCEEDINGS-B, v. 140, N. 1, Jaury 1993, p. 35-43
- MOTION CONTROL, ed. Magnetic-Tecnology, Engenning Handbook, Canoga Park, California, USA
- NETO, Luciano Martins, ANDRADE, Darizon Alves, Motor Esférico - Um Servo Posicionador: 8ª CBA - UFPa - Belém - PA. pag 918 - 923.
- NEWMAN, P. Charles, MURRAY J. John, The Complete Dynamic Model Customized Algorithms of the Puma Robot: IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, v.SMC-17, n.4, july/august 1987.
- NOGUEIRA, Reinaldo Gonçalves, PALHARES, Alvaro Geraldo Badan, Controle de Posição e Orientação de um Manipulador Através de um Mause Espacial: Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP, março de 1995, (Dissertação: Mestrado em Engenharia Elétrica),
- PAIVA, Ely Carneiro, ANDRADE, Darizon Alves, Estudo do Funcionamento de Motores de Passo. Uberlândia: Departamento de Engenharia Elétrica, UFU, 1988, 35p., (Relatório: Estágio Supervisionado e Iniciação científica).
- PALHARES, A. G. Badan, (Anotações da disciplina IA622: Controle de Chaveamento), Crterios de Escolha de Motores. Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP, 2do Semestre de 1994.
- POTKONJACK, Veljko, Thermal Criterion for the Selection of D.C. Drives for Industrial Robots: Proceedings of 16 th ISIR, Belg., 1988. p.129-139, Belgrade, Yugoslávia, 1989.
- POTKONJACK, Veljko, Thermal Analises and Dynamics Capabilits of DC Motors in Industrial Robotic Systems: Robotics & Computer Integrated Manufaturing, v.5, Nro 2/3, 1989, p.137-143.
- POTKONJACK, Veljko, Jaksic, Contribution to a Computer-aided Choise of D.C. Motors for Manipulation Robots: Robotica, p.37-41, Belgrade, Yugoslávia, 1989.
- POTKONJACK, Veljko, Thermal criterion for selection for of D.C. drives for Industrial Robots: Robotics & Computer Integrated Manufaturing, v.5, Nro 2/3, p.137-143, Printed in Great Britain, 1989. Eletrical Engeneering Faculty, Bulevaar Revolucije 73, 11000 Belgrade, Yugoslávia.
- PU, J., WESTON, R. H., MOORE, P. R., Digital Motion Control end Profile Planning for Pneumatic Servos: Journal of Dynamics, Systems, Mensurement, and Control. Dec 1992, v.114, p.634-640.
- RAMIREZ, Hebertt J., ZAK, Stanislaw H., The Adaptation of Perceptrons with Applications to Inverse Dynamics Identification of Unknown Dynamic Systems, IEEE trans. on Systems, Man and Cybernetics, v. 21, n.3, May/Jun 1991, p.634-642.
- ROSÁRIO, João Maurício, Etude de Faisabilite d'une comande de type non Lineaire pour robot manipulateur., Paris,Ecole Centrale des Arts eet Manufatctures, 1990. (Tese: Doutorado em Automação Industrial).

- SAKATA, Minoru, HOSOYA, Katsumi, OHBA, Masatoshi. Investigation for Use of Wobble Motor: Journal of Robotics and Mechatronics, Feb. 1991, v.3, p.47-51.
- SCHILDT, Herbert. Turbo C: guia do usuário, São Paulo: McGraw-Hill, 1988, 414 p.
- SEERING, Warren P., SCHEINMAN, Victor. Massachussets: cap 4, Mechanical Design of an Industrial Robot. . In: RIVIN, Eugene I. Mechanical Design Robots. p.29-43.
- SHNEYDOR, n.A., A Procedure for the Design of Motor and Coupling for DC Servo Applications: In IEEE INDUSTRY APPICATING SOCIETY ANNUAL MEETING, 24. 1989. San Diego. Conference record of the.... Pscataway: IEEE, 1989. pt. 1, p.171 - 176.
- SILVA, N. C., ROSÁRIO, J. M., BADAN PALHARES, A. G., **Classificação e Tipos de Servoatuadores e Acopladores para Aplicações Robóticas**. Campinas: Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos / Departamento de Sistemas de Controle e Energia / Faculdade de Engenharia Elétricas e de Computação / UNICAMP, fev 1998a, 27 p., (Publicação FEEC n.003/98, 12/02/98).
- SILVA, N. C., BADAN PALHARES, A. G., **Tópicos Avançados na Modelagem e Seleção dos Motores Elétricos**. Campinas: Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos / Departamento de Sistemas de Controle e Energia / Faculdade de Engenharia Elétricas e de Computação / UNICAMP, fev 1998b, 36 p., (Publicação FEEC n.004/98, 12/02/98).
- SILVA, N. C., ROSÁRIO, J. M., **Identificação e Medição dos Parâmetros Estruturais dos Elos**. Campinas: jan fev 1998. . Campinas: Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos / Departamento de Sistemas de Controle e Energia / Faculdade de Engenharia Elétricas e de Computação / UNICAMP, fev 1998c, 70 p., (Publicação FEEC n.005/98, 12/02/98).
- SILVA, N. C., ROSÁRIO, J. M. MADRI, M. K., **Modelagem Dinâmica das Juntas Robóticas Aplicadas ao Robô Jeca II**. Campinas: Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos / Departamento de Sistemas de Controle e Energia / Faculdade de Engenharia Elétricas e de Computação / UNICAMP, fev 1998d, 31 p., (Publicação FEEC n.006/98, 12/02/98).
- SILVA, N. C., ROSÁRIO, J. M., MADRI, M. K., TADEU, V. F., **Noções de Modelagem e Controle de Manipuladores Robóticos**. Campinas: Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos / Departamento de Sistemas de Controle e Energia / Faculdade de Engenharia Elétricas e de Computação / UNICAMP, fev 1998e, 41 p., (Publicação FEEC n.007/98, 12/02/98).
- SILVA, N. C., ROSÁRIO, J. M., BADAN PALHARES, A. G., **Crítérios para Especificação de Atuadores para Manipuladores**. Campinas: Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos / Departamento de Sistemas de Controle e Energia / Faculdade de Engenharia Elétricas e de Computação / UNICAMP, fev 1998f, 8 p., (Publicação FEEC n.008/98, 12/02/98).
- SILVA, N. C., ROSÁRIO, J. M., BADAN PALHARES, A. G., **Escolha de Atuadores Auxiliada por Computador, Baseada na Modelagem Dinâmica de Manipuladores Industriais**. Campinas: Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos / Departamento de Sistemas de Controle e Energia / Faculdade de Engenharia Elétricas e de Computação / UNICAMP, fev 1998g, 7 p., (Publicação FEEC n.009/98, 12/02/98).
- SILVA, N. C., ROSÁRIO, J. M., BADAN PALHARES, A. G., **Análise do Aquecimento, e Problemas da Otimização do Consumo, na Escolha de Motores com Movimentos Incrementais, em Juntas robóticas não Lineares**. Campinas: Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos / Departamento de Sistemas de Controle e Energia / Faculdade de Engenharia Elétricas e de Computação / UNICAMP, fev 1998h, 8 p., (Publicação FEEC n.010/98, 12/02/98).
- SILVA, N. C., ROSÁRIO, J. M., BADAN PALHARES, A. G., **Adaptações no Equacionamento Dinâmico de Manipuladores Rígidos, Visando a Seleção de Atuadores**. Campinas: Laboratório de Sistemas

- Modulares Robóticos / Departamento de Sistemas de Controle e Energia / Faculdade de Engenharia Elétricas e de Computação / UNICAMP, fev 1998i, 8 p., (Publicação FEEC n.011/98, 12/02/98).
- SILVA, N. C., ROSÁRIO, J. M., BADAN PALHARES, A. G., **Determinação Automática da Equação Dinâmica Algébrica para Robôs com Graus de Liberdade genérico, Pelo Método Euler Lagrange, visando a Escolha de Motores.** Campinas: Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos / Departamento de Sistemas de Controle e Energia / Faculdade de Engenharia Elétricas e de Computação / UNICAMP, fev 1998j, 9 p., (Publicação FEEC n.012/98, 12/02/98).
- SILVA, N. C., ROSÁRIO, J. M., BADAN PALHARES, A. G., **Síntese da Seleção de Atuadores e Acionamento de Juntas Robóticas Integrada a Modelagem de Manipuladores Industriais.** Campinas: Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos / Departamento de Sistemas de Controle e Energia / Faculdade de Engenharia Elétricas e de Computação / UNICAMP, fev 1998k, 16 p., (Publicação FEEC n.013/98, 12/02/98).
- SILVA, N. C., ROSÁRIO, J. M., **Adaptações no Equacionamento Dinâmico de Manipuladores Rígidos, Visando a Seleção de Atuadores.**, *Revista Robótica e Automática*, Porto: n. 30, Fev 1998m, p. 12-18
- SILVA, N. C., ROSÁRIO, J. M., **Computer Aided Choise for Actuators Based on Dynamical Model of Industrials Manipulators.** In: RECENT DEVELOPMENT AND APLICATIONS ON DYNAMICS, STABILITY AND CONTROL, J. M. BALTAZAR, P. B. GONÇALVES, J. CLAYNER EDITORS, 1998n. 21p., (in press).
- SILVA, N. C., ROSÁRIO, J. M., BADAN PALHARES, A. G., **Análise Dinâmica e dos Problemas do Atrito e Compensação Gravitacional na Junta.** Campinas: Laboratório de Sistemas Modulares Robóticos / Departamento de Sistemas de Controle e Energia / Faculdade de Engenharia Elétricas e de Computação / UNICAMP, mar 1998o, 41 p., (Publicação FEEC n.001/98, 23/03/98).
- SIMULINK, Microsoft Windows-m, Dynamic System Simulation Software: Usuer's Guide, The MathWorks, Inc., Ira ed, March 1992.
- SPONG, M. W., VIDYASAGAR, M, Robot Dynamics and Control: John Wiley & Sons, Inc., 1989, 336p.
- STIOPIN, Stiopin, P. A, Resistência de Materiales. Ed Mir, Moscou, 1968, 367p.
- TADEU, Valmir, Modelagem Dinâmica de Maipuladores de Quatro Barras. Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas, 1997, 122p. (Dissertação: Mestrado em Engenharia Elétrica).
- TIPLER, Paul A., Física, Rio de Janeiro, Guanabara Dois S.A., 1978, v.1, Cap.6, Forças de Contato e de Atrito, p.151-154.
- TAKAMORI, Toshi, Recent Trends in the Development of New Actuators: *Journal of Robotics and Mechatronics*, Feb. 1991, v.3, p.18-27.
- TRZYNADLOWSKI, Trznadlowisk, Andrei, Energy Optimization of a Certain Class of Internal Motion DC Drives: *IEEE, Transaction on Industrial Eletronics*, v.35, n.1 Feb 1988 p 60-65.
- VACHTSEVANOS, George, KWAN, C. K., Development of a Novel Intelligent Robotic Manipulator: *Control Systems Mag*, Jun 1987, p.9-15.
- VUKOBRATOVİĆ, M., POTKONJAK, V., Kati'c D., Computer aided choise of eletrohydraulic actuators for manipulation robots, *Proc. of 14th ISIR*, Gothenburg, 1984 711-721.
- VUKOBRATOVİĆ, M., Jaksi'c, N, Computer aided choise for DC Motors for manipulation robots, *Robotica* 4, n.1, 37-41, 1986.

- VUKOBRATOVIC, Mimir. Applied Dynamics of Manipulation Robots. Modelling, Analysis and Examples. Belin: ed. Springer-Verlab..1989. A Mathematical Models of Driving Units. p.227-283.
- YUAN, Kui. WANG, Congqing, KIYOSHI, Wada. New Approach to Parameter Identification of Robot Manipulators: IEEE Transaction on SMC, 1984, p. 773-775. (Alguns Artigos sobre Robôs).
- WALRATH, Harris Hebert. Adaptative Bearing Friction Compensation Based on Recent Knowledge of Dynamic Friction: AUTOMATICA, 1984, v.20, N 6, p.717 - 727.
- WOLFRAM, Mathematica (Graphics), cap. 1, A practical Introduction to Mathematica, p. 141-177.

Referências Bibliográficas

- ACARNELEY, P. P., Current Measurements in Three-Phase Brushless DC drives. IEE Proceedings-B, v.140, n.1, p.71-79, 1993.
- BARAKATI, Nabajyoti, Borlands C++ 4 developer's guide, Sams Publishing, 1994, indianapolis, Indiana, USA.
- CHANG, Fu-Juay, TWU, Shih-Hisiung, CHANG, Shyang, Tracking Control of DC Motors via an Improved Cattering Alleviation Control. IEEE Trans. on Ind. Electronics, v.39, n.1, Feb 1992.
- BERGAMASCO, M., Salsedo, F, Dario, P, Linear A Linear SMA Motor Direct-Drive Robotic Actuator. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 1989, Scottsdale, Piscataway, IEEE, v.1, p.618-623, 1989.
- CARLSON, Renato, LAJOIE-MAZENE, Michel, FAGUNDES, João C., Analysis of Torque Ripple Due to Phase Commutation in Brushless de Machines. IEEE Trans. on Ind. Aplic., v.28, n.3, p.632-638, May/Jun 1992.
- CHEN, Chi-Tsong, Linear System Theory end Disign, Holt, Rinehart and Winston
- CORLESS, Martin J., LEITMANN, George, Continuous State Feedback Guarateeing Uniform Ultimate Boundedness for Uncertems Dynamics Systems. IEEE Trans. on Automatic Control, v.AC-26, n.5, October, p.1139-1144 1981.
- DAVEY, Kent, VACHTSEVANOS, Richard Powers, The Analisis of Fields and Torques in Spherical Induction Motors. IEEE. Transactions on Magnetics, v.MAG-23. n.1, p.273-182, January 1987.
- D'AZZO, John J., HOUPIS, Constantine H.; Análises e Projeto de Sistemas de Controle Linear; Rio de Janeiro, 2 ed. Guanabara dois, 1994.
- DESA, S., Roth, B., Syntesis of Control Systems for Manipulators Using Multivariable Robust Servomechanism Theory. The International Journal of Robotics Research. v.4, n.3, p.20-35. 1985.
- DISTURBANCE Observer-Based Motion Central of Direct Drives Motors. Proc. IEE, Trans. on Energy Conversion, v.6, Sep 91, n.3, p.546.
- DOYLE, John C., STEIN Gunter, Multivariable Feedback Design: Concepts for a Classical Modern Synthesis. IEEE trans. on Autom. Contr., v.AC-26, n.1, Feb 1981, p.4-16.
- ELETROMECHANICAL, Eletromechanical Forçes and Torque in Bruhsless Permanente Magnet Machines, Proc. IEE Trans. on Energy Conversion, v.6, Sep 1991, n.3, p.536...
- FAISON, Ted, Borlands C++ 4.5 Object-Oriented Progrmming, Sams Publishing, 1995, indianapolis, Indiana, USA.

- FITZGERALD, A. E., CHARLEY JR., Kingsley, KUSKO, Alexander. Máquinas Elétricas. McGraw-Hill, São Paulo - SP, 1975. 623p.
- FOKUDA, Takamori, TOSHIO, HIDEKI, Hosokai, Micro-Machine. Journal of Robotics and Mechatronics, Feb. 1991, v.3, p.1-7.
- FRANCESCO, Francesco, Manual de Molas Protec. Protec, São Paulo. SP, 1993.
- FRANCIS, Francis, B. A., WONHAM, W. M., The Internal Principle of Control Theory. Automatica, v.12, n.5-E. 1976, p.457-465.
- GIERRAS, Jacek F., Two-Phase Rotary-Linear Induction Motor For Propulsion of Robot End-Effector. Bydgoszcz: Dept. of Electrical Machines and Drives. Academy of Technology and Agriculture. ACADEMY of Technology and Agriculture, Poland. In. ICEM, 1988. p.165-169.
- GRCAR, Bojan, DOLINAR, Rago, JEXERNIK, Karel, Non Linear Control for High Performance Motor Drives. In. CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, CONTROL AND INSTRUMENTATION, 1991, Kobe. IECON Proceedings. Los Alamitos: IEEE, Computer Society, 1991. v.1, p.843 - 848.
- GUZZELLI, M. B. Paiva, Eletrônica de Potência. Ed Unicamp, Campinas SP, 1986.
- GUTMAN, Shaul, Uncertain Dynamical Systems - A Lyapunov Min-Max Approach. IEEE Trans. on Automatic Control, v.AC-24, n.3 Jun 1979, p.437-443.
- HARRIS, Hebert. A Comparison of Two Basic Servomechanism Types, Transaction AIEE, 1947, v.66, p 84 - 93.
- HALLIDAY, Robert, HALLIDAY, David. FÍSICA: Eletricidade - Magnetismo - Óptica. 4ª ed, Rio de Janeiro, Livro Técnico S.A., 1970, v.2, p.705 - 1128.
- HASHIMOTO, M., Hirabayashi, H., KIYUSAWA, T, Harmonic Drive with a Built-in Torque Sensor and Its Application to Torque Control. Journal of Robotics and Mechatronics Vol.3, N.4, pp 306-313, 1991.
- HAUTAU, Lane A., DIPIETRO, Frank A., Planing Robotic Production Systems. Informacional, cap 34, Handbooks, 1992.
- HEMATI, Hemati, N., The Global and Local Dynamics of Direct-Drive Brushless DC Motors. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 1992, Nice. Proceedings, Piscataway: IEEE, 1992. v.2, p.1858-1863.
- HOLLING, George, Back-to-Basic part II, Introduction to Motors. Power Conversion & Intelligent Motion, v 17, n.2, Feb 1991 p 38-44.
- HOLLING, George, Back-to-Basic part III, Speed Control techniques. Power Conversion & Intelligent Motion, v 17, n.3, March 1991, p 35-38.
- JAMSA, Kris, Salvo pelo C++, LTC, Rio de Janeiro, 1994.
- JOHNSTON JR, E. Russel, Beer, Ferdinand P., Estática: São Paulo: Mc Graw-Hill, 1980.
- JUFER, M., Radulescu, M. M., Comparative Study of slotted and slotless electronically-commutated permanent-magnet DC servomotors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND DRIVES, 5, 1991, London conference publication, n, 341. Stevenage: IEE, Michael Faraday House, 1990, p.451 - 456., 1991, p.131-135.
- KARUANADASA, J. P., Renfrew, A. C., Analysis, of torque production in brushless DC and AC motor drives. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND VARIABLE-SPEED DRIVES,

- 4, 1990, London, IEE conference publication, n. 324. Stevenage: IEE, Michael Faraday House, 1990. p.451 - 456.
- KRAFT, TeleRobotics, Inc. Underwater Manipulator System. Kraft TeleRobotics, Inc., 1985.
- KREYZING, Erwin, Advanced Engeneering Matemáticas. 7ª ed, Willey & Sons, New york, 1993.
- KURIBAYASHI, Katsutoshi, Micro-Robot Using Reversible SMA actuator. Journal of Robotics and Mechatronics, Feb. 1991, v.3, p.52-56.
- KWAI, Hayashi, IWAO, IWATSUKI, Nabuyuki, Research of a Spherical Motor with Tree-Degree-of-Freedom Driven by Ultrasonic Linear Actuators. Journal Jpn. Soc. Presc. Eng. v.59, n.3, p.405-410, 1993.
- LAMPOR, Leslie, LATEX, A Documentation Preparation System. Addison-Wesley Publ Company, 4ª ed, May 1986
- LAING, Ingborg, LAING, Nikolaus, Rotodynamic Pump With Spherical Motor. United States Patent n.4,352,646, Oct 5, 1982.
- LANGHARDT, F. E. Wilhelm, Robô Alto Custo do Projeto Barato. São Paulo: IX SCNB - Aem, V JIAI - Jorn. Int. de Aut. Ind., v.10, n.08, p.8-10, Ago 1989.
- LEE, WHITNEY, Daniel E., Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Protheses, IEEE Trans. on Man Machine Systems, v.MMS-10, n.2, Jun 1969. p.47-53.
- LUH, J. Y. S., WALKER, M. W., PAUL, R. P. C., Resolved-Acceleration Control of Mechanical Manipulators: IEEE Tans. on Automatic Control, v.AC-25, n.3, Jun 1980, p.468-474.
- MANGAÑA, Mario, ZAK, Stanislaw H., Robost State Stabilization of Discrete-Time Uncertain Dynamical Systems: IEEE Transactions on Automatic Control, v.33, N0 9, Sep 1988, p.887-891.
- MARILIER, P., RICHARD, J. A., Non-Linear Mechanic and Electric Behavior of a Robot Axis with a Harmonic Drive Gear: Robotcs & Computer-Integrated Manufacturing., v.5. n.2/3. p.129-136, 1989.
- MEGATORQUE, MEGA, Livro, cap 4, Cotrols of Actuators in Robotics Mecchanisms, Direct Drive Actuator, p.276-281.
- MURRAY, Richard M. MURRAY, Deno, D. Cutis, PISTER, Kristofer S. J., SASTRY, S. Shankar, Control Primitives for Robot Systems:, IEEE Trans. on Systes Man and Cybernetics, v.22, n.1, Jan 1992, p.183 193.
- NAHON, M, Angeles, J., Minimization of Power Losses in Cooperating Manipulators Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control, v.114, Jun 1992, p.213-219.
- NIKIFORUK, P. N., TAMURA, K., Design of a Disturbance Accommodating Adaptative Control System and Its Application to a Dc Servo Motor System with Coulomb Friction: Journal of Dynamics, Systems, Measurement, and Control. Dec 1988, v.110, p.343-349.
- OGATA, Teoria dos Sistemas Lineares,
- OLIVEIRA, Antônio de Melo, KUMAKURA, Augusto Haruo, PAULA, Pedro Ferreira: Protótipo de 100 cv de um "Bruhsless DC Motors" para Propulsão Naval. São Paulo: (COPESP - Coordenaoria para Projetos Especiais, Av Prof. Lineu Prestes, 2242 - SP)
- OLIVEIRA, Antônio de Melo, PALHARES, A. G. Badam, KUMAKURA, A. H., et all, Analises of Brusless DC Motor Performance When Faunts Occurence, Anais EPE, FIRENZE, 1991

- OPTIMAL Setting for Discrete PID Controllers. IEE Transactions on Energy Conversion: IEE Proceedings, v.139, n.1, Jan 1992. v.139, N.3, May 92, IEE proc., Conectionist approach to PID Autotuning, Transactions on Energy Conversion.
- PAGANO, Daniel, Controlador Digitaki PID Adaptativo para Processos Industrais: IX SCNB - Aem, V JIAI - Jorn. Int. de Aut. Ind., n.08, v.1, 8-10 Ago, 1989, São Paulo - SP.
- PARK, Gwi-Tae, YOO, Ji-Yoon, et all, Design of Digital Servo for Drum Motor in Home VCR: In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELETRONICS, CONTROL AND INSTRUMENTATION, 1991, Kobe. IECON Proceedings, Los Alamitos: IEEE, 1991. v.1, p 251-256.
- QU, Zhihua, DORSEY, Jhon, Robust Traquing Control of Robots by Linear Feedback Law: IEEE trans. on Automatic Control, v.36, n.9, p.1081-1084, Sep 1991.
- ROHER, Rohrer, Hermann G., Novas Persperctivas de Robôs Industriais com Movimento Suaves. IX SCNB - Aem, V JIAI - Jorn. Int. de Aut. Ind., n.08, v.10, 8-10 Ago, 1989, São Paulo - SP.
- SCHMIDT, Peter B., LORENS, Robert D., Design Principles and Implementation of Acceleration Feedback to Impove Performance of cd Drives: IEEE Trans. on Ind. Applic., v.28, n.3, May/June 1992, p.594-599.
- SISSON, Leighton E., PITTS, Donald R, Fenômenos de Transporte: Rio de Janeiro, Guanabara Dois S.A., 1979, 765p.
- SLOTINE, Jean-Jacques E., The Robust Control Robot Manipulators: The International Journal of Robotics Research, v.4, n.2, p.49-63, 1985.
- TAKANO, Eisuke, Ohya, YOSHIHITO, Saeki, Masato, Oscillattions Caused by Solid Friction in a hidraulic Driving System: JSME International Journal, serie III, v.35, n. 3, 1992.
- UMENO, Takaji, HORI, Yoichi, Generalized Robust Servosystem Design Based on The Parametrization of Two Degrees of Freedom controllers: In: ANNUAL IEEE POWER ELETRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 20, 1989, v.2, p 945 - 951.
- VACCARO, Richard J., HILL, Simon D., A Joint-Space Command Generator for Cartezian Control of Robotic Manipulators: IEEE Journal of Robotics and Automation, v.4, n.1, Feb 1988, p.70-75.
- VANGSNESS, Carl, Comparison of Brush and Brushless servo Motors Designs:, In, ANNUAL CONFERENCE OF ELETRICAL ENGENEERING PROBLEMS IN THE RUBBER AN PLASTICS INDUSTRIES, 40, 1988, Akron. IEEE Conference Record New york: IEEE, 1988, p.60 - 65.
- VIBET, C., Introduction a L'emploi des Quartenions Pour le Calcul de L'inversion des Coordonnées des Robots: Laboratoire de Robotique, Université Paris XII-IUT 22, allée j. Rostand, 91011 Evry Cedex. Revue Française de Mécanique n.1987-4, p.238-242.
- YAO, Paul, Borlands C++ 4.0 Progrmação For Windows - Guia Oficial Borland: Macron Books, McGrawHill Ltda, São Paulo, Brasil, 1994.
- WANGSNESS, Wangness, Carl, Comparison of brush end bruhsless servo motors designs: IEEE CONFERENCE RECORD OF ELETRICAL ENGINEERING PROBLEMS IN THE RUBBER AND PLASTIC INDUSTRIES, Piscataway, NJ, USA, 11-12 Apr, 1988, p.60-65.
- WILLIAMS, F. C., LITHEWAITE, E. R. EASTHAM, J. F. Development and Design of Spherical Induction Motors: proc. of the Intitution of Eletrical Engineers: Power Engeneering, v.106, n.3036, p.471-484, dec 1959.
- ZHUANG, M., ATHERTON, D. P. Automatic Tuning of Optimum PID Controlers: IEE Proceedings-D, v.140, n.3, May 1993.

Anexo A:

Detalhes da Programação Auxiliar de Apoio e Teste

Este anexo tem a finalidade apresentar algumas características especiais dos programas principais através da seção A.1, descrever os programas de apoio e simulação dos manipuladores através das seções A.2 e A.3, e ainda, citar e descrever alguns programas de testes de operação dos **softwares** desenvolvidos neste trabalho através da seção A.4.

O programa AAMMOVISA descrito na seção A.2, é o programa mais importante focado neste anexo, porque ele serve de apoio e fornece dados para o desenvolvimento de todos os demais programas, apesar de não estar relacionado diretamente com o processo de seleção de atuadores e modelagem dinâmica. Ele permite a leitura e definição das condições de operações de alguns tipos de manipuladores e dos atuadores, simula estes manipuladores e é através dele que se define as configurações de acionamento das juntas. A segunda seção mais importante é a A.4 onde são apresentados alguns programas de testes para algumas das partes da programação, que foram também essenciais para a construção da programação e que permitem também a modelagem algébrica de manipuladores. Ver listas dos programas subrotinas e algoritmos mais importantes na lista de programas no início desta tese.

Existem alguns programas secundários citados na lista de programas que não foram discutidos no corpo da tese, mas eles receberão destaque especial no seu prosseguimento através deste anexo, porque também tem uma importância básica e juntamente com eles serão acrescentadas algumas informações extras sobre os programas principais e as formas de se relacionarem entre si.

A.1 Adições aos Programas Principais

Esta seção visa adicionar informações aos programas principais que foram apresentados no corpo desta tese, os quais são, AMODIRO e AFICESE do capítulo 2 e ASELATUM e SIGECOSAM do capítulo 3. Há informações básicas sobre estes programas também na lista de programas

no início desta tese, mas aqui serão acrescentadas os fluxogramas dos programas AFICESE e ASE-LATUM.

A.1.1 AFICESE - Algoritmo de Fusão, Integração e Compatibilização Estrutural dos Elos

O AFICESE, é um programa que tem a função de fundir os atuadores e seus acessórios selecionados para as juntas superiores da cadeia cinemática em cada elo, gerando um arquivo com parâmetros geométricos em ambiente C compatível com o ambiente do aplicativo MATHEMATICA, onde são realizadas a programação de modelagem e remodelagem dinâmica exigida no processo de seleção de atuadores, vide maiores explicações no capítulo 2, e também no seu fluxograma dividido em duas partes nas figuras A.1 e A.2.

A.1.2 ASELATUM - Algoritmo de Seleção de Atuadores para Manipuladores

O ASELATUM é o programa usado para analisar e selecionar atuadores, motores e redutores das juntas do manipulador e que considera observando os diversos critérios estabelecidos no capítulo 3, veja seu fluxograma representado na figura A.3.

A.2 AAMMOVISA - Algoritmo de Análise de Manipuladores Modulares Visando Seleção de Atuadores

Para estudar a seleção de atuadores de qualquer processo, é necessário o conhecimento do processo e do seu comportamento, e isto pode ser conseguido a partir da observação do próprio processo, de um protótipo e/ou da simulação analógica ou digital do mesmo. No caso da seleção de atuadores de manipuladores, que é o interesse deste trabalho, é preciso conhecer o processo certas informações indispensáveis do funcionamento e operação dos manipuladores. Neste caso, o manipulador JECA II disponível, se encontrava em fase de projeto e desenvolvimento, estando seu acionamento sujeito a diversos outros fatores que poderiam interferir no processo, e por estar em desenvolvimento, isto dificultaria a separação dos problemas específicos dos atuadores. É evidente que isto se sugere vários temas desafiadores e muito interessantes para teses de doutorado. Entretanto, considerando que estes são problemas difíceis de serem resolvidos, em função da complexidade, multiplicidade, da escassez de tempo e das condições financeiras acessíveis e seguras no momento e que divergiriam dos objetivos deste trabalho, decidiu-se pela simulação dos manipuladores na busca de dados específicos.

A princípio cogitou-se o desenvolvimento do programa de simulação do processo utilizando-se duas formas de programação: a sequencial - PS e a orientada a objeto - POO. A POO é mais recente, sendo a tendência dos produtores de softwares apresentando várias vantagens [WINBLAND,

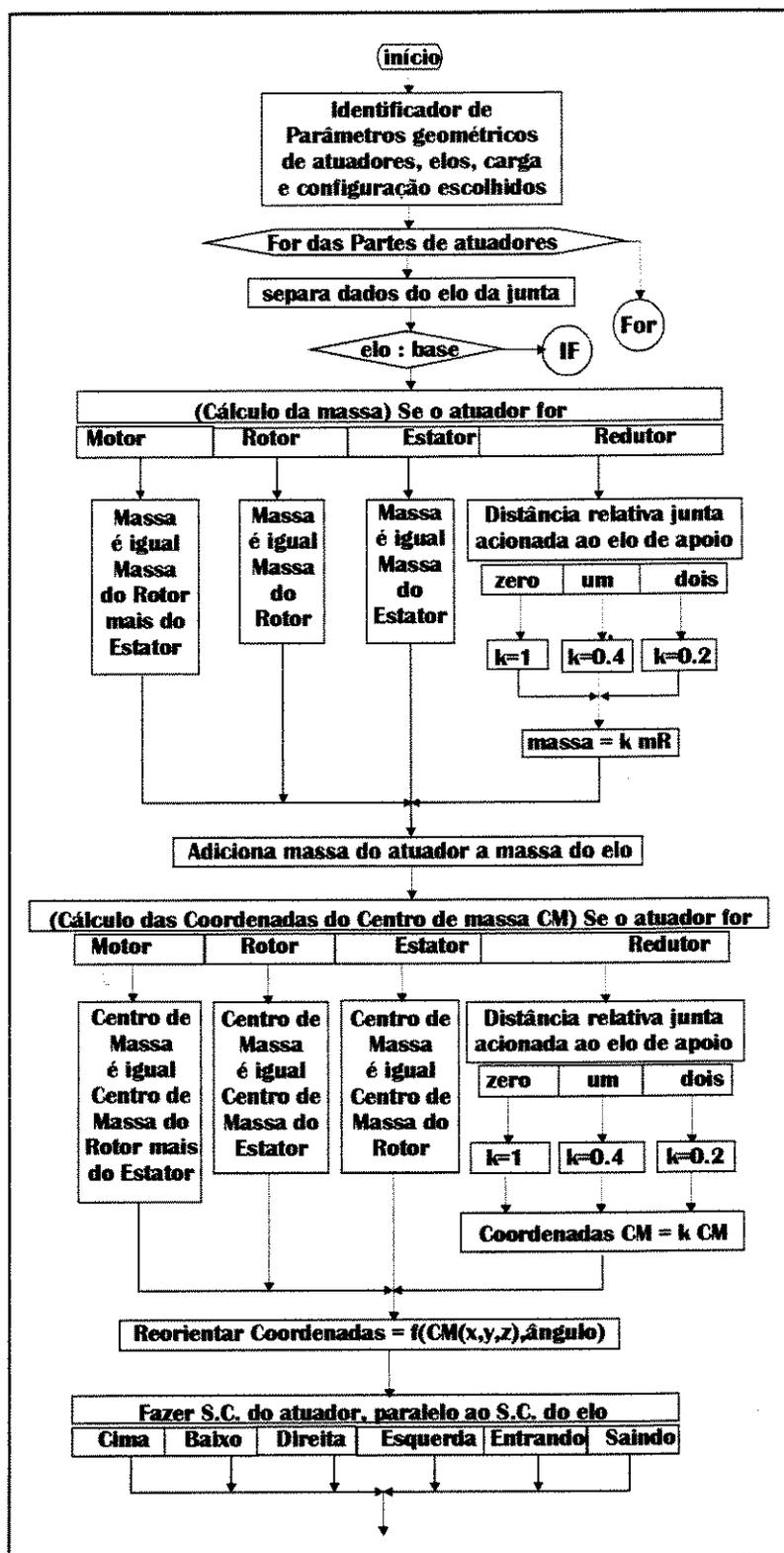


Figura A.1: Parte I do Fluxograma Geral do AFICESE

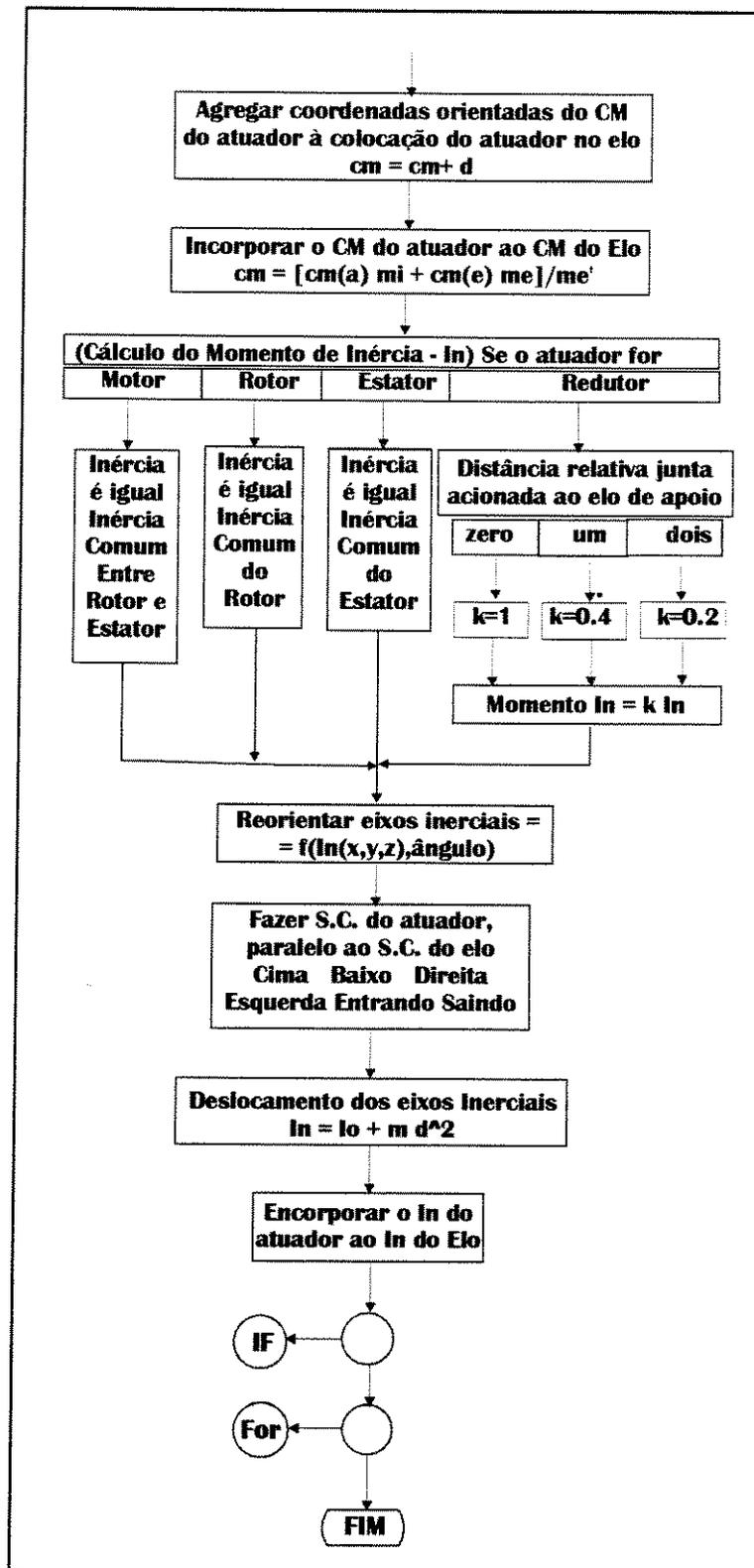
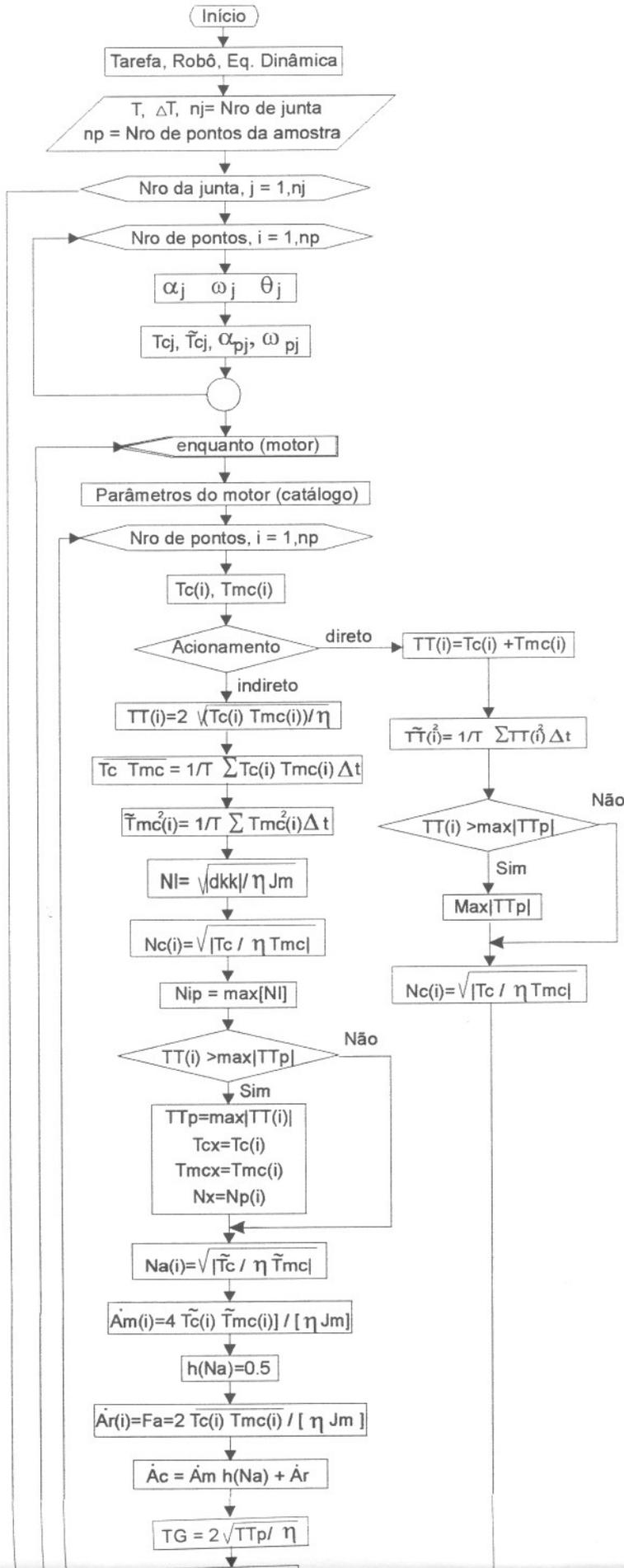
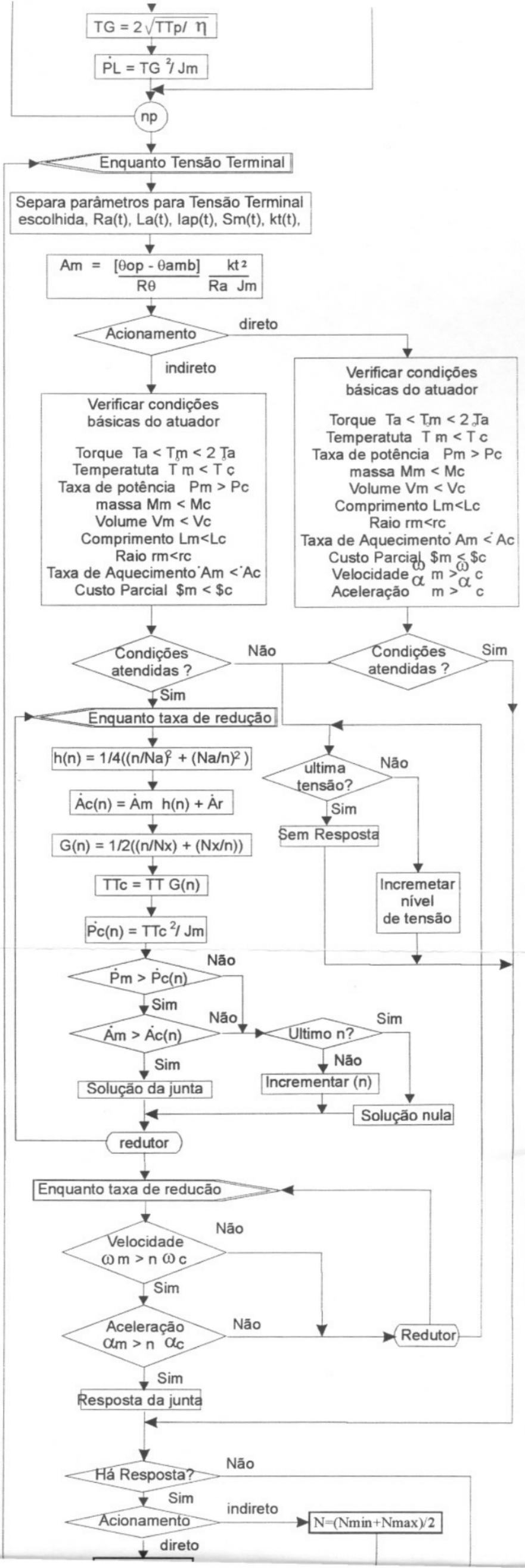
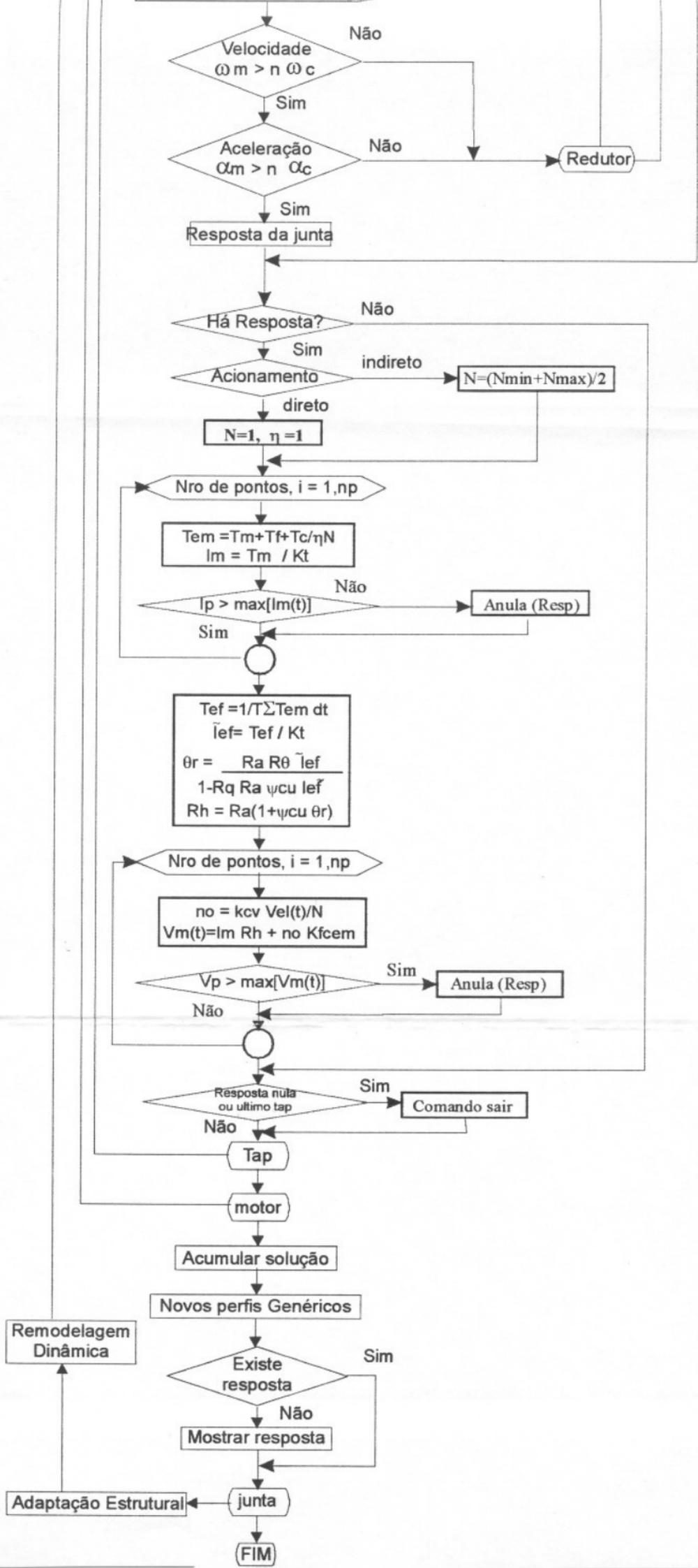


Figura A.2: Parte II do Fluxograma Geral do AFICESE







93], e a PS é tradicional e portando se tinha mais domínio sobre ela. O tempo de realização deste programa estava ficando escasso, os programas em PS já se encontravam em estado bastante desenvolvido, e como a simulação do manipulador não era a questão mais importante, mas apenas um acessório preocupado em simular o processo e ler e gerar com precisão os parâmetros requeridos pelo processo de seleção de atuadores, optou-se por continuar este caminho até o domínio completo da simulação de alguns modelos de manipuladores utilizando-se PS, sem se importar com a utilização de um novo tipo de programação. O resultado final foi o desenvolvimento do programa AAMMOVISA, que é o tema desta seção, utilizando-se o compilador C++ versão 1.1 da BORLANDtm, sem a preocupação de utilizar os seus recursos de POO. A finalidade deste anexo, é descrevê-lo tecnicamente por partes, mostrando o modo pelo qual tudo foi construído e o seu funcionamento.

A seleção de atuadores para manipuladores proposta no capítulo 3 deste trabalho, é adaptativa, e requer o domínio do processo, dos parâmetros e variáveis de entrada, intermediárias e de saída. O conhecimento das grandezas dinâmicas modeláveis, deve ter o máximo de precisão possível. A simulação do modelo cinemático e dinâmico deve ser feita de tal forma a dar uma idéia mais próxima da realidade possível. A simulação cinemática de manipuladores, a entrada de parâmetros gerais da carga e da tarefa, e a definição das configurações de atuadores, são realizadas pelo algoritmo AAMMOVISA, veja seu fluxograma apresentado em duas partes nas figuras A.4 A.5, que será o programa mais importante a ser discutido neste anexo, porque representa a base desta tese e o apoio para os programas de modelagem e seleção.

O AAMMOVISA é um programa básico que visa dar suporte, apresentar os problemas hipotéticos, simulando os possíveis tipos de manipuladores, realizando a entrada de dados do processo, padronizando os bancos de dados conforme suas aplicações, facilitando e sugerindo de forma visual a entrada de parâmetros da carga, da tarefa e das configurações de acionamento.

Uma das características particulares do AAMMOVISA, é que sua elaboração preocupasse em representar apenas robôs planares de até três graus de liberdade, que como aqueles ilustrados pela figura A.6, por sua simplicidade seus modelos, podem ser facilmente determinados e reconhecidos, permitindo uma concentração dos esforços deste trabalho em outros tipos de estudos que tem maior originalidade, uma vez que a modelagem e simulação de atuadores é um estudo já dominado pela engenharia moderna.

A.2.1 Definição do Modelo Cinemático

A.2.1.1 Cinemática Direta

O processo de determinação da cinemática direta, que determina a configuração da estrutura a partir do conhecimento dos ângulos de juntas, é extremamente simples e pode ser efetivada empregando Geometria. Esta técnica foi empregada aqui para proporcionar simultaneamente a apresentação visual do modelo planar desejado. Para qualquer que seja o robô planar optado, há uma função genérica chamada *braço* que pega as coordenadas iniciais, o ângulo do braço, o

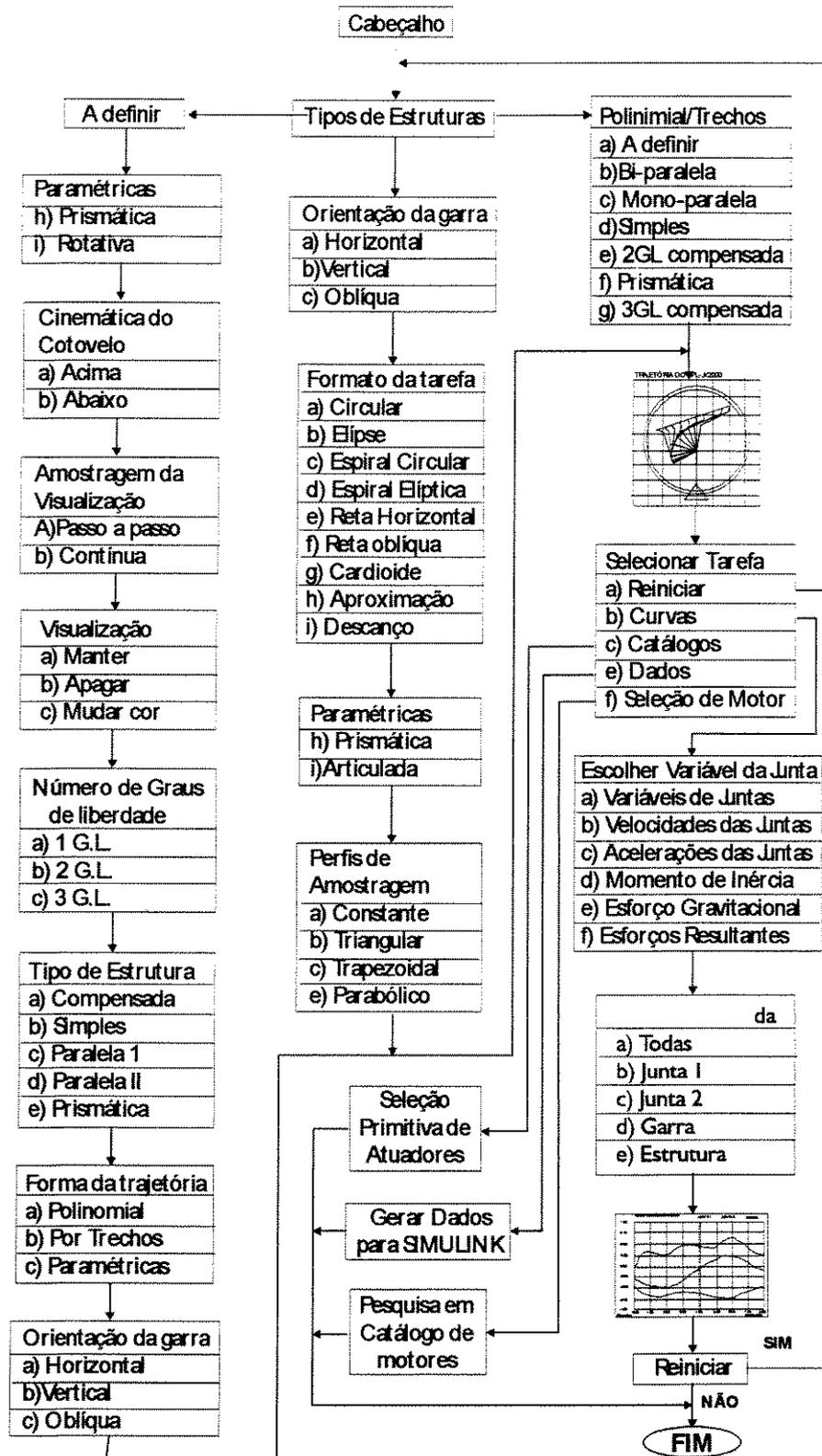


Figura A.4: Parte I do fluxograma do programa AAMMOVISA



Figura A.5: Parte II do fluxograma do programa AAMMOVISA

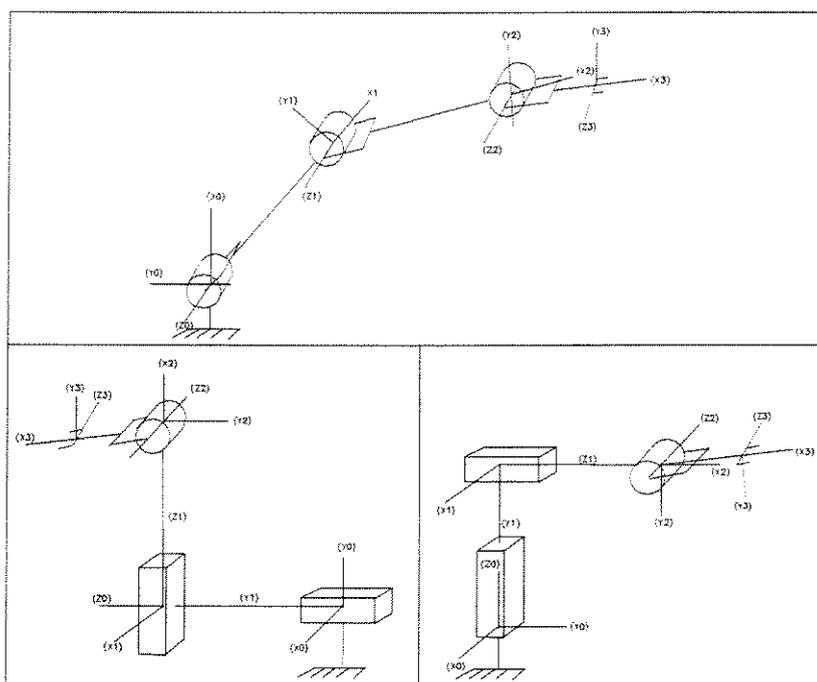


Figura A.6: Tipos de modelos de robôs completos usados

seu comprimento e sua largura, e o desenho de cada elo. A partir disto usando-se a função *liga* determina-se as coordenadas finais do elo e traça-se as linhas dos braços com o auxílio da função *line* do turbo C.

O programa citado anteriormente, começa traçando cada elo da base até a garra para cada intervalo de tempo. Dependendo do tipo de manipulador desejado, esta função é chamada mais de uma vez para traçar cada grau de liberdade, por exemplo, se o robô for de barras paralelas, a função chamada para definir cada barra que compõe o elo, e as coordenadas finais da última chamada, determinam o início do elo seguinte. Se o elo for provido de dispositivo de compensação de massa, a função *braço* é chamada duas vezes, na primeira vez ela desenha uma haste com defasamento de 180° definindo o contrapeso ou a base do robô e na segunda vez é utilizada para traçar a haste de ação do elo sem defasamento no ângulo. No caso do manipulador planar cartesiano, as coordenadas finais de dois elos subsequentes não se encontram nas extremidades, como no caso dos manipuladores de juntas rotacionais.

Num processo de análise mais acurado e complexo de um robô espacial e genérico, pode-se ignorar o visual, e usar as matrizes de Transformação Homogênea obtendo-se as coordenadas da ponta e orientação da garra.

A.2.1.2 Cinemática de Velocidade (Espaço das Juntas)

A definição da posição angular da junta é dada pela cinemática inversa, estabelecida pelo conhecimento de cada ponto e orientação da garra, assim, pelo conhecimento da geometria estabelece-se a equação de cada junta.

A definição da velocidade angular ω_i no ponto de amostragem i , é dada pela razão entre variação da posição angular q entre duas amostragens consecutivas e o tempo Δt_i gasto para que a junta se desloque de uma a outra amostragem, (veja equação abaixo). Isto caracteriza a **velocidade angular média** para a junta entre aqueles dois pontos. Este valor assim determinado, se aproximará da velocidade instantânea, que é a derivada do perfil de posição angular no tempo, tanto mais, quanto menor for a taxa de amostragem e quanto linear e menor for o deslocamento.

$$\omega_i = \frac{q_{(i+1)} - q_i}{\Delta t_i}$$

A aceleração é definida pela variação velocidade média determinada no parágrafo anterior, e portando, requer o conhecimento de no mínimo três pontos de amostragem consecutivos, uma vez que é a variação da variação do deslocamento, veja equação a seguir.

$$\alpha_i = \frac{\omega_{(i+1)} - \omega_i}{\Delta t_i} = \frac{q_i - 2q_{(i+1)} + q_{(i+2)}}{\Delta^2 t_i}$$

Por causa deste conceito de determinação dos perfis, os gráficos das acelerações apresentados no capítulo 4, geralmente não se anulam no final do tempo de execução da tarefa, pois, seriam necessários mais duas amostragens para definir o resto do perfil de amostragem. Isto deve ser resolvido num caso prático de controle de manipulador, entretanto, como estes exemplos visaram somente ilustrar o processo de seleção de atuadores das juntas, determinou-se as acelerações somente até a anti-penúltima amostragem, onde o gráfico foi truncado antes do final da tarefa.

A.2.1.3 A Cinemática Inversa

A determinação da cinemática inversa pela geometria em robôs planares, como aquela definida em [SILVA, 89e] é simples. Sabe-se que o manipulador precisa atingir um determinado ponto do plano, que sua base é fixa num ponto conhecido. A garra representada pela figura A.7 tem uma orientação específica para atingir aquele determinado ponto ou coordenada do espaço cartesiano para realizar a tarefa de forma controlada. Assim, conhecendo-se as coordenadas das tarefa $T_{x,y}$ e sua orientação, pode-se determinar as coordenadas da ponta da cadeia de posicionamento, considerando que neste caso a garra representa a cadeia de orientação completa, veja na figura A.8.

Para o modelo articulado escolhido, optou-se por simplicidade ao construí-lo com os dois primeiros elos de comprimento l_1 e l_2 iguais, com isto determina-se α que é o ângulo entre os dois primeiros elos e o alinhamento da base para a ponta da cadeia de posicionamento cuja inclinação é β . Assim, fica determinado que o ângulo do primeiro grau de liberdade é $\theta_1 = \alpha + \beta$.

O ângulo do segundo grau de liberdade é $\theta_2 = \pi - 2\alpha$, pode ser também facilmente

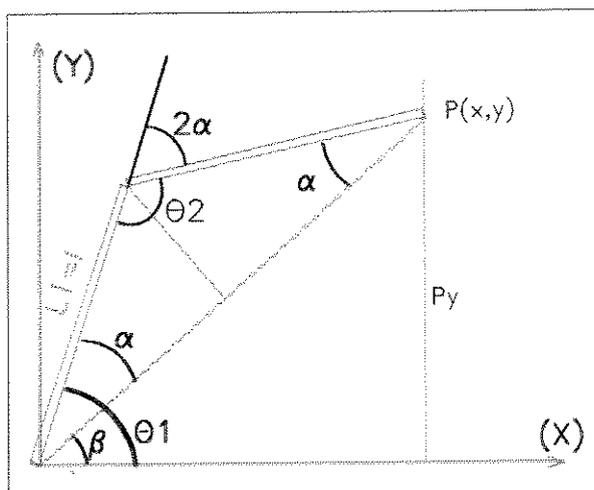


Figura A.7: Determinação geométrica da cinemática inversa da cadeia de posicionamento do RPL2000

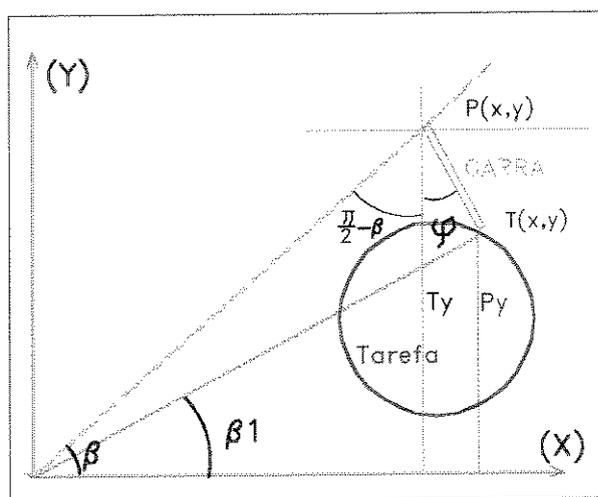


Figura A.8: Determinação geométrica da cinemática inversa da garra do RPL2000

verificado geometricamente na figura A.7 e na figura A.9 que mostra o manipulador planar completo. Assim, quando é solicitado de um manipulador semelhante, que sua garra atinja um determinado ponto com uma determinada orientação necessárias para uma realização, a sua orientação determina o ângulo θ_3 da garra, conhecendo se o mesmo e o ponto da tarefa, determina-se as coordenadas da cadeia de posicionamento e assim, pela geometria da mesma, os ângulos das demais juntas. Para outros manipuladores, dependendo da complexidade dos mesmos, a cadeia de orientação, senão toda cadeia cinemática, seriam resolvidas mais facilmente por um processo analítico (transformada homogênea), geralmente a cadeia de posicionamento é facilmente resolvida pela geometria.

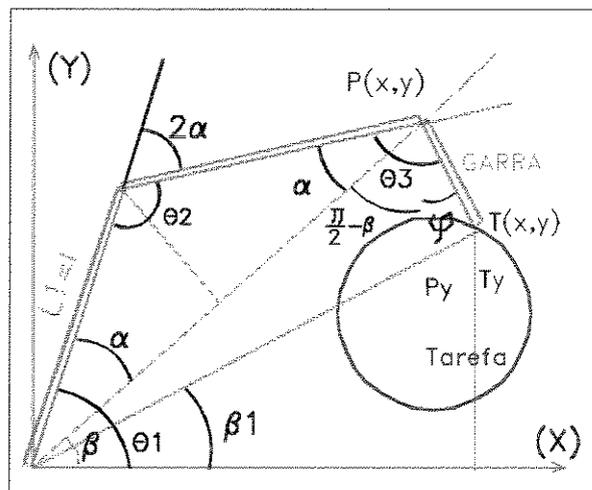


Figura A.9: Determinação geométrica da cinemática inversa do RPL2000

A.2.1.4 A Relação dos ângulos de Junta

O cotovelo do robô planar tratado aqui, é o seu segundo grau de liberdade, Neste caso, em termos geométricos, a junta pode assumir duas posições específicas para que o resto da estrutura se mantenha parado em relação ao sistema referencial, a estas duas possibilidades são nomeadas cotovelo acima ou cotovelo abaixo, e pode ser escolhida no programa, pela entrada de um sinal, $k = 1$ ou -1 . Este k é multiplicado pelo ângulo α , e dependendo do sinal dele, pode-se determinar as duas possíveis configurações para a cadeia de posicionamento, como ilustra-se na figura A.10. Dependendo do número de graus de liberdade, há diversas possibilidades para cada junta, principalmente se a estrutura é espacial, e exigiria uma decisão para a escolha de uma configuração ideal para cada junta ou para o conjunto, logo, $\theta_2 = \pi - 2k\alpha$, é o ângulo entre o segundo e o primeiro elo, definindo o segundo grau de liberdade.

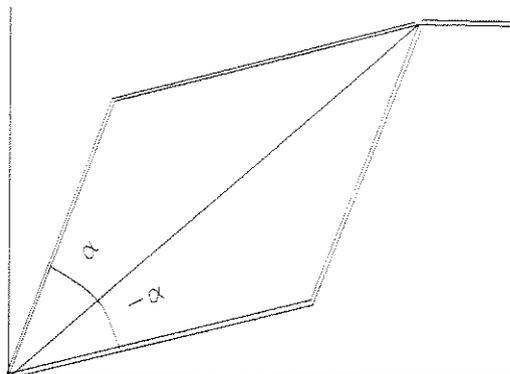


Figura A.10: Definição geométrica do sentido da dobra do cotovelo

A.2.2 A estrutura do Robô Manipulador

A definição da estrutura do robô manipulador é a parte desta programação que preocupa com a definição dos parâmetros físicos e geométricos, do tipo de estrutura e dos graus de liberdade do robô e das partes básicas (elo, base e garra) que o compõem como um todo.

A.2.2.1 Parâmetros Físicos e Geométricos

A identificação dos parâmetros físicos e geométricos é importante para a definição da estrutura do robô, porque fornece os elementos estáticos que o caracteriza, e que distinguem os tipos e a dimensão de cada robô, são eles, as massas, os momentos de inércia, as coordenadas dos centros de massa e os parâmetros de Denavit Hartenberg.

1. Massa dos Elos - devem ser medidas pela pesagem dos elos isoladamente, ou pela somatória das massas das partes que o compõem. Neste trabalho foram estimadas.
2. Momentos de Inércia dos Elos - são obtidos pelo conhecimento das concentrações das massas e da geometria de cada parte ou de todo o elo, e também pela medição usando-se balanças de torção.
3. Coordenadas dos Centros de Massas dos Elos - poderiam ser obtidos pelo cruzamento dos prolongamentos de duas retas geograficamente verticais passando por um ponto de suspensão da peça para duas posições diferentes.
4. Parâmetros de Denavit Hartenberg - são identificados de forma semelhante àquela indicada pela figura A.11.
 - (a) ângulos θ , são os ângulos entre duas juntas consecutivas, sendo constante para juntas prismáticas e variável para juntas articuladas.

- (b) Deslocamentos d , mede o desalinhamento de dois elos consecutivos através do eixo da junta.
- (c) Comprimento a , mede a distância entre duas juntas consecutivas ou o comprimento dos elos e é constante para juntas articulados e variável para as juntas prismáticas.
- (d) *Offset* α , mede o ângulo constante entre o eixo da junta e o elo da frente.

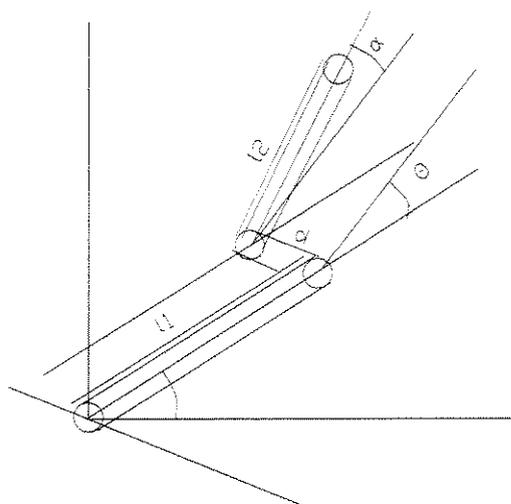


Figura A.11: Distinção dos parâmetros de Denavit Hartenberg numa junta

A.2.2.2 Tipos de Estruturas

O tipo de estrutura do manipulador é identificado pelas regras estabelecidas no item 2.3 do capítulo 2, que identifica a ordem do grau de liberdade do manipulador, o tipo de estrutura do elo, o tipo de junta, o tipo de acionamento, e a (posição relativa) ou elo onde cada motor se encontra fixado. Assim, se pode definir e reconhecer seis estruturas *defaults* completas de manipuladores planares pré definidas no AAMMOVISA e que são ilustradas e definidas pela figura A.12, que são do tipo:

1. **Compensada:** é a estrutura indicada pela figura A.12c, com todos os graus de liberdade do tipo articulado rotacional, e os elos são completamente contrabalanceados em relação aos eixos das juntas, apresentando uma extensão simétrica ao elo em relação ao eixo. Para o balançamento total da junta, basta uma extensão, mas, para compensação total do manipulador deve ser inserido um contrapeso na haste de extensão para que os momentos gravitacionais em torno dos elos sejam nulos. Neste caso, apresenta três graus de liberdade com três juntas articuladas e contrabalanceadas, o que o classifica como do tipo $CCC - RRR - \times \times \times - \times \times \times$

2. **Simples:** é a estrutura indicada pela figura A.12f, que possui três graus de liberdades com juntas articuladas simples sem compensação, o que o classifica como do tipo $SSS - RRR - \times \times \times - \times \times \times$, duas variações destes tipos de estrutura são $SS - RR - \times \times - \times \times$ ou $S - R - \times - \times$ que representam, respectivamente, manipuladores de dois e um grau de liberdade.
3. **Paralelas:** são as duas estruturas indicadas pelas figuras A.12a e A.12b, que possuem os três graus de liberdades articulados, mas a primeira estrutura apresenta articulação do segundo elo com barra de transmissão paralela ao primeiro elo, e aos demais elos são simples sem compensação. Já a estrutura da figura A.12b apresenta o primeiro grau de liberdade com transmissão em paralelo também. Estas duas estruturas são classificadas respectivamente como $PPS - RRR - \times \times \times - \times \times \times$ e $SPS - RRR - \times \times \times - \times \times \times$.
4. **Prismáticas:** são as estruturas cujas juntas são predominantemente do tipo prismáticas, no caso presente são exemplificadas pelas figuras A.12d e A.12e, onde os dois primeiros graus de liberdades, possuem juntas do tipo prismáticas e a garra articulada simples sem compensação de peso, sendo ambas classificadas como $SSS - PPR$.
5. **Mista,** é a estrutura que apresenta dois tipos de articulação diferentes numa mesma estrutura. Se a garra for considerada como um grau de liberdade, pode-se dizer que as estruturas das figuras A.12a, A.12b, A.12d e A.12e são mistas, ressaltando que este tipo de classificação geralmente considera somente a cadeia de posicionamento [SPONG, 89].

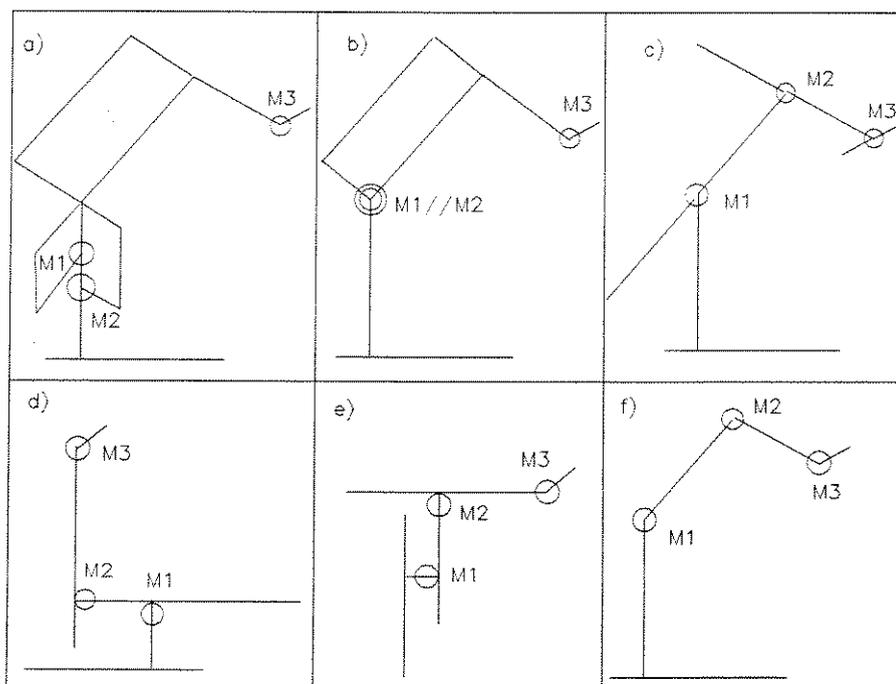


Figura A.12: Configurações de manipuladores simulados pelo programa AAMMOVISA

A.2.2.3 Número de Graus de Liberdade

As cadeias simuladas aqui tem até três graus de liberdades. Em cada situação da ponta do atuador, define-se a cinemática inversa e para a cinemática inversa cada elo terá uma orientação que será definida pela geometria.

A redução do grau de liberdade da estrutura no AAMMOVISA é definida pela não consideração da garra, ficando apenas dois graus de liberdade, neste caso, a cadeia de posição toca diretamente a tarefa, e a cinemática inversa é definida unicamente pela busca dos ângulos θ_1 e θ_2 para as cadeias articuladas, ou d_1 e d_2 para as cadeias prismáticas.

Pode-se dizer que um pára-brisa ou um pêndulo invertido ou não e o carro de um impressora, são estruturas respectivamente rotacionais e prismáticas de um grau de liberdade. A simulação de um grau de liberdade, já não pode seguir qualquer tipo de trajetória, senão um arco de uma circunferência ou uma linha reta conforme esta estrutura seja respectivamente rotacional ou prismática.

A.2.3 Visualização Gráfica do Robô

A visualização gráfica e virtual da tarefa não é tão importante para o aspecto da modelagem dinâmica, nem da seleção de atuadores nem redefinição da estrutura do robô, mas é tão importante, somente do ponto de vista do fator apresentação e compreensão do processo, para o qual se esta dimensionando a estrutura do robô. Cada passo ou cena do robô no processo é elaborada pela função *projeta()* que desenha a estrutura a partir da definição da cinemática inversa.

A.2.3.1 Dinâmica Visual da Imagem para Realização da Tarefa

A representação gráfica do robô é ilustrada pela figura A.13, onde algumas cenas definem a perseguição de um trecho de trajetória a ser cumprida pela garra. Toda vez que uma cena é definida, a função *projeta()* é chamada duas vezes, na primeira vez ela define a cena atual do atuador e na segunda vez ela pode manter, modificar ou apagar a cena anterior trocando-lhe a cor. Na manutenção das cenas de todas as amostragens da simulação do manipulador realizando um percurso definido, a cor não é trocada de uma para outra amostragem. Quando a cor das cenas é modificada entre uma e outra amostragem, a impressão da imagem fica definida pela segunda chamada da função, que reprojeta a estrutura na cor acinzentada a partir da segunda chamada, aparentando-se como uma sombra. Já a eliminação das projeções da estruturas nas amostragens anteriores da estrutura, são obtidas pela alteração da cor pela chamada da função *setcolor()* (veja [SCHILD, 98]), seguida da segunda chamada da função *projeta()*, que a reprojeta da cor do fundo, ficando a impressão de ter desaparecido.

Outra característica interessante da apresentação da imagem da estrutura do manipulador, a ser definida no início da simulação, é a continuidade do processo da apresentação da

dinâmica da estrutura. Esta característica é definida pela espera ou não de um toque no teclado. Se o processo é contínuo as imagens são formadas uma a uma sem interrupção, conforme o número de pontos de amostragens definidos no percurso da tarefa. Entretanto, se o processo for definido discreto, ocorrerá uma interrupção cada vez que a imagem da configuração da estrutura for completada em cada amostragem. Neste caso, entre cada amostragem o processo de espera de um toque de uma tecla até a conclusão do processo.

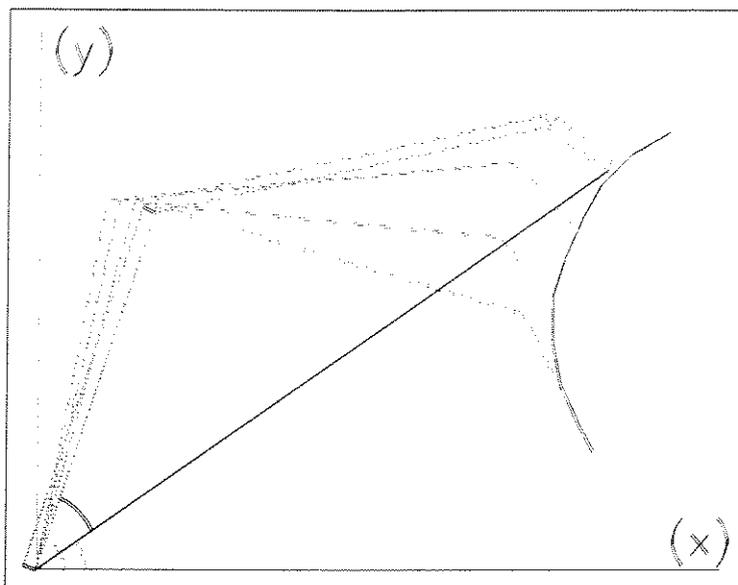


Figura A.13: Um manipulador planar seguindo uma trajetória

A.2.3.2 Visualização do Volume de Trabalho

Para os modelos usados nesta programação, o volume de trabalho pode ser chamado área de trabalho por que se limita ao plano de ação do manipulador, como os limites dos ângulos das juntas não são definidos para os modelos de robôs rotacionais, o volume de trabalho tem a conformação de uma circunferência dentro da qual a garra pode tocar em qualquer ponto, ainda que com uma única orientação. Para os robôs prismáticos, a área de trabalho tem forma quadrada. A figura A.14 ilustra com perfeição mais esta característica da apresentação do programa AAMMOVISA, onde para ambos os casos, a área menor é a área de trabalho somente da cadeia de posicionamento da garra de ambos modelos.

A.2.3.3 Características Secundárias

Outras características são identificadas na apresentação visual dos modelos escolhidos, entre elas encontra-se o **desenho do sistema de coordenadas cartesianas da base do robô**,

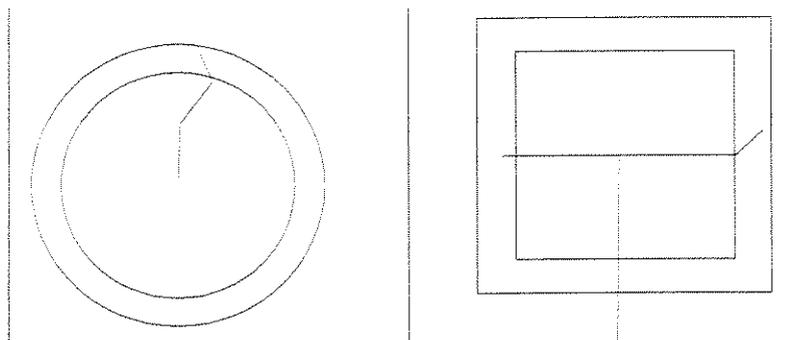


Figura A.14: Visualização do volume de trabalho

que é o traçado de uma linha constante e fixa que representa a base, para que o observador não fique com a impressão de que o modelo esteja flutuando no ambiente gráfico.

Há outra característica interessante que é a **visualização da trajetória da ponta da garra**, criada para deixar a impressão do caminho da ponta da garra ou ferramenta durante o percurso ou execução da tarefa.

Um aspecto da apresentação visual do programa, é a **visualização da grade do ambiente** que é importante para dar uma noção dos sistemas de coordenadas da base e das dimensões relativas das partes do robô. E finalmente, se tem a **visualização do título**.

A.2.4 Funções Diversas

Existem muitas outras funções elaboradas com finalidades diferentes nesta programação, destaca-se entre os grupos destas funções aquelas usadas para **Visualização Gráfica** que representa curvas de funções exemplares de referências para modelos fixos, tais como as **Variáveis de Juntas** e suas derivadas como: velocidade das juntas, acelerações das juntas e ângulos das juntas, torques totais, torque de gravidade e torque inercial etc. A parte de visualização gráfica, permite duas formas de fazer a apresentação destas curvas, isolada por junta, ou simultaneamente para todas as juntas.

Existem também aquelas funções responsáveis pelas **escalas gráficas** verticais e horizontais, nomeação de títulos, abcissas e ordenada, legenda, e pequenos textos de detalhes. Sobre o traçado de gráficos, tem-se ainda as funções de **normalização dos gráficos múltiplos** que se preocupa em manter a proporcionalidade dos gráficos traçados no ambiente destinado a ele na tela do computador.

E finalmente, tem-se o chamado **sistema interativo do programa com o operador**, que apresenta diversas telas com diversas questões de chamadas de entradas de dados. São dezenas delas por onde entram os parâmetros do robô, da tarefa, da carga e do acionamento, esta última

propriedade facilita a compreensão dos dados requeridos, bem como mostra avisos de finalização de procedimentos pelo programa.

A.2.5 Definição da Tarefa do Robô pelo o Operador

As tarefas que o operador deseja imprimir ao robô, são definidas por alguns parâmetros, que devem ser solicitados pelo programa no início de sua execução para descrição do seu procedimento e exato cumprimento da tarefa. A entrada destes dados é uma das primeiras funções desta programação, e são: o estabelecimento das coordenadas e orientação da garra no início e final da tarefa, a descrição do seu comportamento durante o percurso da tarefa que é associado á definição dos perfis cinemáticos da tarefa no espaço cartesiano, definição do tempo de execução, e das propriedades físicas e geométricas da carga, tais como: massa, centro de massa, coordenadas cartesianas e esforços causados na estrutura do manipulador.

A.2.5.1 Coordenadas Iniciais e Finais da Garra

O estabelecimento das coordenadas iniciais e finais da garra acontece de duas formas. Na seqüência da operações a programação verifica se é desejada a entrada de dados "defaults" ou de dados conhecidos, se a opção for pela entrada de dados *defaults*, ele assume valores de dados de exemplos internos para estas coordenadas e de outra forma, as coordenadas são pedidas uma a uma via teclado. Nestes casos, se o sistema for espacial, serão necessários escrever as coordenadas do primeiro e do último ponto a ser tocado pela ponta da garra durante a realização da tarefa.

A.2.5.2 Orientação Inicial e Final da Garra

A orientação inicial e final da garra é definida da mesma forma que ocorrido para as coordenadas iniciais e finais, mas o parâmetro estabelecido aqui, é o ângulo exigido para a cadeia de orientação no início e final da tarefa, conforme a ferramenta utilizada e fixada na garra, que geralmente requer uma orientação adequada durante a realização da tarefa, assim, a orientação da garra deve ser totalmente controlada para que isto ocorra. Se o manipulador fosse espacial, deveria ser passado para a programação, os ângulos de Euler, ou os ângulos de orientação e elevação da cadeia de posicionamento referidos ao sistema inercial. Como o manipulador utilizado aqui é planar, basta passar apenas o ângulo da garra em relação ao eixo x do sistema de coordenadas inercial para o programa.

O conjunto de parâmetros "default" que é estabelecido quando ignora-se a entrada de outros dados, estabelece-se três situações para a garra, na primeira ela varia de 135° a 90° , na segunda de 135° a 10° , e na última de 90° a -30° , que são respectivamente chamadas de horizontal, vertical e oblíqua.

A.2.5.3 Tempo de Execução e ou Número de Pontos do Percurso

O tempo de execução da tarefa e/ou o Número de Pontos do Percurso são dois outros parâmetros que podem ser necessários para a realização da tarefa pois, pode ser exigido que o manipulador execute sua tarefa num tempo determinado, o que seria natural num processo industrial. O número de pontos de amostragem também poderia ser importante se precisássemos definir vários pontos no percurso da garra para fazer, por exemplo, uma soldagem. Estes dois parâmetros também são pré-definidos nesta tese, onde para quase todas simulações de processos robóticos executando tarefas, foram colhidos 50 de amostragens para percursos ou tarefas com duração de 5 segundos, quando não definido de outra forma.

A.2.5.4 Trajetórias

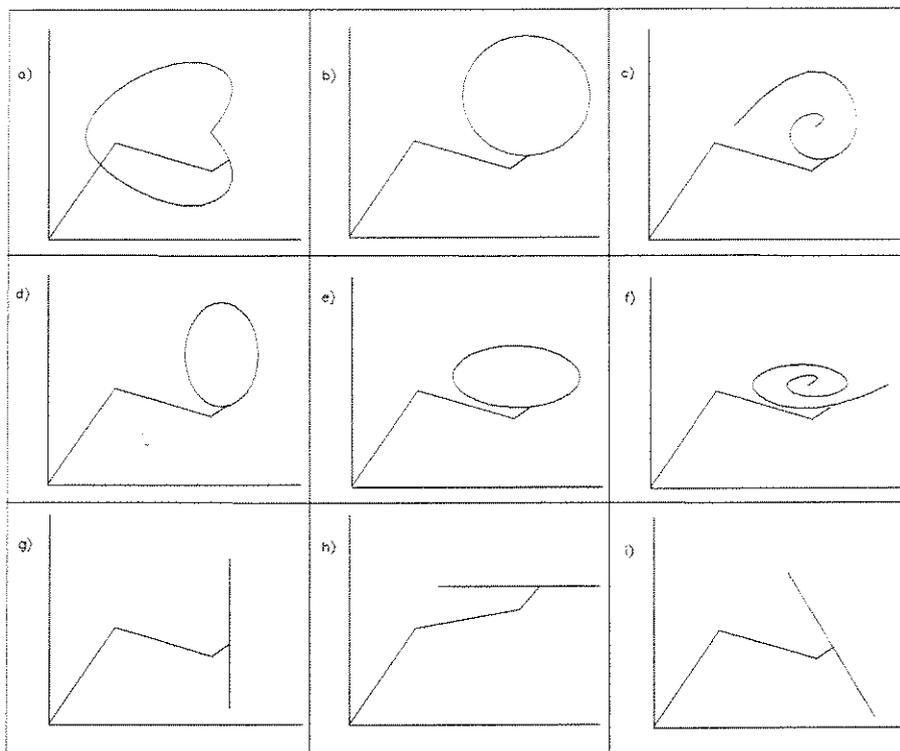


Figura A.15: Definição das formas de tarefas básicas *defaults*

Existem diversas maneiras de fazer um gerador de trajetórias, como visto no capítulo 2, pode ser pelo emprego de manipuladores mestre/escravos, uso de *joystick* (*mouse* espacial), definição de equacionamento paramétrico que pode ser fixo e embutido na programação, pela seleção de múltipla escolha de numeração ou nomes dispostos no vídeo de um PC através do teclado ou pelo *mouse* que pode assumir diversas variações através da utilização de sistemas operacionais do tipo

"windows", ou poderia ser pela entrada direta das equações das curvas paramétricas via teclado como realizado na prática graças a um interpretador construído por [MADRID, 94].

Na busca de uma saída simplificada, a definição de trajetórias retas com especificação dos perfis de velocidade e aceleração, podem ser definidos de duas formas, na primeira, estes parâmetros são identificados com trechos de retas, rampas e parábolas, e na segunda, por equacionamento polinomial, sendo ambos definidos como indicado no capítulo 7 de [CRAIG, 89]. Se for desejado que a garra siga uma trajetória com uma geometria diferente de uma reta, é preciso definir vários pontos desta trajetória e fazer com que a garra siga ponto a ponto a forma adotada, para isto, o programa emprega equações paramétricas que permitem que a garra siga as trajetórias de formas geométricas variadas que são embutidas internamente no corpo do programa.

Usando-se os métodos de [CRAIG, 89] para definição das trajetórias, foram definidos basicamente três trajetos, um quase vertical, outro quase horizontal e um oblíquo. Quanto ao formato das trajetórias usando equações paramétricas, foram definidas equações para seis tipos de trajetórias que são representadas pela figura A.15, são elas: **retas**, **elipse**, **círculo**, **cardióide**, **espiral circular** e **espiral elíptica**. Vale observar aqui que este tipo de equacionamento permite a definição de tarefas repetitivas, o que é exemplificado quando usa-se a trajetória de forma circular, que é repetida por três vezes.

A.2.5.5 Algoritmo de Posição, Velocidade e Aceleração no Espaço Cartesiano

No item anterior empregou-se duas formas de determinação da trajetória, uma delas com duas variações que é a proposta do capítulo 4 de [CRAIG, 89] que programa os perfis de velocidade, posição e aceleração por trechos, para que a garra siga as trajetórias retilíneas determinadas entre dois pontos. De outra forma, ela define um polinômio de terceira ordem para a posição cartesiana da garra, a velocidade é definida pela derivada e a aceleração pela derivada segunda do polinômio. Uma vez conhecidas as posições, velocidades e acelerações no início e final do percurso, ficam também conhecidos os coeficientes das equações e também os perfis cinemáticos.

Os perfis de tempo devem ser definidos quando usa-se curvas paramétricas para determinar as coordenadas da trajetória da garra. Neste trabalho são definidos quatro tipos de perfis de variação do tempo δt para as equações das trajetórias utilizando-se equações paramétricas, os quais são: parabólico, trapezoidal ou triangular como mostra a figura A.16, e constante.

A forma do perfil do parâmetro tempo, pode ser qualquer uma, e os procedimentos para defini-las, é sempre análogo àqueles empregado para explicar a definição do perfil trapezoidal adotado na figura A.17. Para que o robô siga uma trajetória, exige-se também o conhecimento do número de pontos de amostragem np e do tempo total t desejado para ele realizar a tarefa. ou uma forma para defini-los. Sucessivamente, cria-se um primeiro laço de contagem i para o número de pontos, assim, para cada i contado determina-se um tempo virtual $T(i) = \frac{i}{np}t$, e para cada i , calcula-se a ordenada h da função forma escolhida para o perfil, e a somatória destas ordenadas define o tempo T virtual total. Uma vez que se conhece o T , reinicia-se o laço de número de

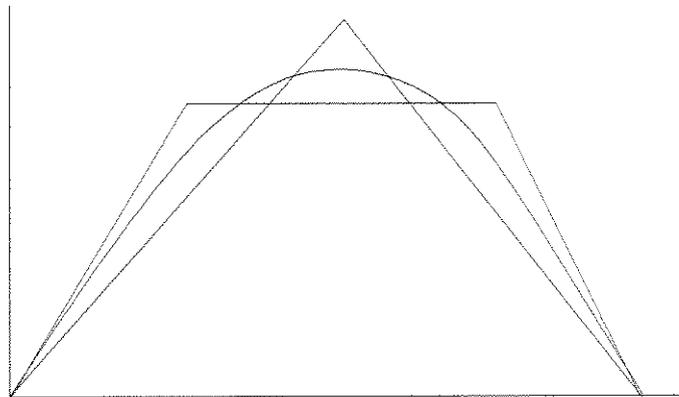


Figura A.16: Formas dos perfis de variação do tempo

pontos, mas para definir a variação do tempo seguindo o perfil reescalonado de variação de tempo $\delta t_{(i)} = h(i) = \frac{t}{T}H(i)$. Esta escala garante que para aquele número de pontos e perfil desejados, a somatória de todos os $\delta t_{(i)}$ desejados, será igual ao período de tempo t também desejado.

Particularmente, ao que se refere ao AAMMOVISA, existe a possibilidade de escolha de um dos quatro perfis de tempo preestabelecidos internamente para este tipo de cinemática, pode ser **constante**, **triangular**, **trapezoidal** ou finalmente, **parabólico** (veja figura A.17).

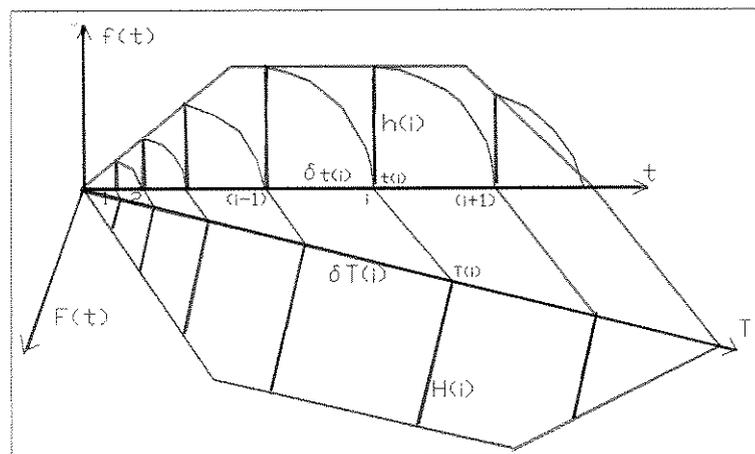


Figura A.17: Determinação de perfis de variação do tempo

A.2.5.6 Carga Propriamente Dita

Outro aspecto importante para a definição da tarefa, além da orientação e posicionamento, é a definição da carga e/ou ferramenta para a qual ele está capacitado a conduzir ou esforço

requerido para executar a tarefa programada. Alguns autores incorporam a ferramenta na garra, e outros a consideram como parte da carga. Aqui, carga e ferramenta serão considerados como um todo e definido como carga.

Para definição de uma carga passiva ou massa transportada, utiliza-se parâmetros físicos geométricos como: **massa da carga, coordenadas da carga no sistema de coordenadas da garra e inércia da carga**. Este é o único tipo de carga utilizada nesta programação. Mas ainda poderia ser levado em conta dois fatores importantes caso o manipulador tivesse carregando uma carga ativa como uma ferramenta furadeira ou de soldagem. Seria a especificação do esforço causado pela atuação desta ferramenta, pressão e manutenção da mesma sobre a trajetória da garra.

Deve-se ressaltar que o AAMMOVISA considera a carga como passiva e que há uma definição interna dos valores dos parâmetros citados, sejam eles algébricos, numéricos, ou nulos. Caso não seja necessário, ele possibilita também a entrada de valores personalizados, à escolha do operador.

A.2.6 Definição da Configuração do Sistema de Acionamento

Esta é uma parte muito importante desta programação. Ela facilita e melhora a compreensão da entrada de parâmetros sobre o **tipo de acionamento e posicionamento relativo e distribuição de atuadores na estrutura das juntas e do robô** sendo imprescindível para a seleção dos mesmos, por que sugere a correta inserção dos parâmetros que devem ser introduzidos com uma rigorosa e correta indicação da orientação dos atuadores que entram e que saem da estrutura, para uma determinação idônea do processo de readaptação dos parâmetros e reestruturação do modelo dinâmico do robô usado no processo de seleção de atuadores e na verificação do tipo de acionamento mais viável para a estrutura.

A figura 4.27 ilustra nove configurações pré estabelecidas para estruturas planares de três graus de liberdade e articuladas com ou sem contrapeso. Nesta figura, os círculos representam os **motores** e os quadros **redutores e transmissores** de energia que são indicados respectivamente pelas letras M, R e T, e o índice que for encontrado à frente delas, indica o número da junta acionada por cada um deles.

Baseado na figura 4.27 se pode identificar nove estruturas de manipuladores, que seguindo a identificação da seção 2.3 do capítulo 2, da figura 4.27a até a figura 4.27h são em ordem as seguintes *SSS – RRR – DDD – 123*, *SSS – RRR – IDD – B23*, *SSS – RRR – III – BBB*, *SSS – RRR – IID – B13*, *SSS – RRR – IDI – B2B*, *CCC – RRR – DII – BC2B*, *CCC – RRR – DII – C1C2B* e *CCC – RRR – IID – BC1B*.

A.2.6.1 Multiplicidade de Configurações

A multiplicidade de configurações indica o número de configurações que se deseja passar para o processo de análise de seleção do acionamento. A programação permite a escolha de uma ou várias entre as 9 configurações *defaults* (pré-definidas) na figura 4.27, ou a definição de uma ou mais configurações personalizadas através da interação operador versus vídeo. Se a opção indicada for a primeira, o banco de dados é incrementado por uma ou várias daquelas configurações simples indicadas na figura 4.27, no máximo seis delas para manipuladores sem contra peso, ou no máximo três para manipuladores com contrapeso. Caso se opte por todas as configurações *default* simultaneamente, o programa arquivará automaticamente no banco de dados reservado para análise posterior, somente aquelas que forem coerentes com a estrutura de manipulador escolhida conforme a presença ou não do contrapeso.

A multiplicidade é permitida também, quando a leitura for personalizada ou seja, definida pelo programador, podendo ser **simples** ou **múltipla**.

A.2.6.2 Definição do Tipo de Acionamento

O acionamento pode ser definido como **direto** ou **indireto**, conforme o motor seja acoplado diretamente à junta ou por meio de redutor de velocidade ou transmissor, isto é feito para a entrada de dados de cada junta acionada por meio de um quadro de múltipla escolha.

A.2.6.3 Relação tipo Acionamento e Atuador

Dependendo do tipo de acionamento escolhido para cada junta, cada parte do atuador deve ser convenientemente isolada para redistribuição na estrutura geral. Nem sempre o motor está totalmente integrado na estrutura do elo da junta acionada, nem mesmo num único elo, que é o que ocorre quando o acionamento é do tipo direto, onde o rotor ou o estator se encontra separadamente integrado em elos subsequentes.

Quando o acionamento é do tipo direto, geralmente o motor, os redutores e os transmissores se encontram totalmente no elo vizinho, isto requer que rotores, estatores ou motores, tenham tratamento diferenciado para a correta reestruturação e modelagem dinâmica.

Normalmente, a entrada dos parâmetros destas partes incluem centro de massa, momento de inércia, massa, orientação, indicação da junta acionada por eles e do elo no qual o atuador se apoia estruturalmente dentro da configuração da estrutura da cadeia cinemática do manipulador.

A.2.6.4 Distribuição do Redutor na Estrutura Relativa a Localização do Motor

A identificação dos redutores na estrutura do robô, relativa à localização do motor, não tem uma importância do ponto de vista de um projeto real, mas isto foi necessário para determinar uma regra para determinação da massa dos redutores e transmissores, conforme distanciamento da junta acionada e do motor que a aciona, pois não há um estudo aprofundado sobre os redutores e isto foi necessário para estabelecer uma regra geral para definir, o momento de inércia, e a massa para os redutores, conforme a sua posição relativa na estrutura.

A.2.6.5 Definição do Acionamento por Juntas

A definição do acionamento por junta deveria ser tomado automaticamente pelo programa, que produziria uma lista das possíveis situações das configurações. Isto serviria como base para uma análise posterior da situação e que fosse mais minuciosa, determinando a melhor dentre todas definidas. Porém, este programa deixa a definição das configurações mais atraentes a critério do operador, simplificando o a análise, tirando o fator automatização total, o que deverá a ser considerado numa versão futura e mais avançada.

A.2.7 Posicionamento Relativo ou Distribuição dos Atuadores na Estrutura do Robô

Os atuadores são partes necessárias para a dinâmica do robô e seu casamento com o elo de apoio é muito importante. Por isto, este casamento requer uma redefinição da orientação posição, dos centros de massas, dos momentos de inércia e da massa dos elos durante alterações destes elementos nos processos seleção de motores e de redimensionamento das tarefas e cargas.

A figura A.18 foi elaborada com o objetivo de mostrar a flexibilidade do ponto de posicionamento dos atuadores na fase de projeto. As linhas azuis, paralelas à haste vertical da base que partem de cima para baixo a partir da primeira junta, definem as distâncias em porcentagem do comprimento total da haste da base. De outra forma, isto é feito também para as hastes das demais juntas, onde estes pontos são marcados por um pequeno círculo definindo os possíveis pontos para fixação de atuadores numa estrutura modular.

Os atuadores e suas partes se distribuem nas partes móveis (garra e elos) do robô ou na base. Quando eles se situam nas partes móveis, eles tem uma razão a mais para influenciar no carregamento dinâmico das juntas, primeiro, como é de se esperar, ele produz esforço, e seu eixo se comporta como uma carga para si próprio, e depois, excentricamente dos casos convencionais, porque o seu peso contribui para aumentar as massas das estrutura dos outros elos do robô que não aquele acionado por ele, mas pelos atuadores de outras juntas. Assim, a modificação ou troca do atuador modifica o elo estruturalmente, pois varia sua massa, centro de massa e momento de inércia. Por esta razão o programa apresenta um quadro de múltipla escolha que permite ao operador dizer

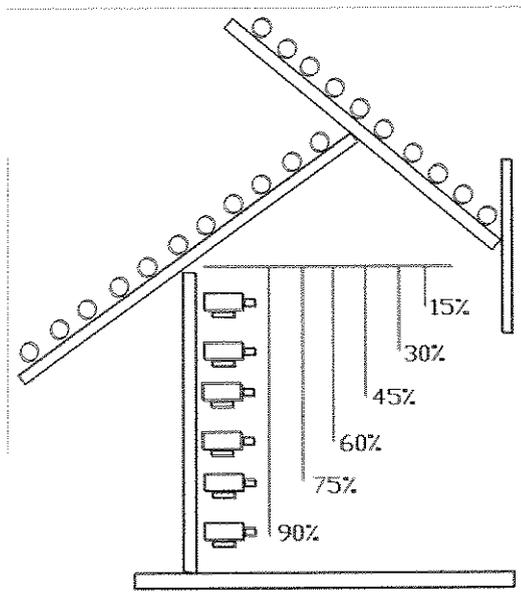


Figura A.18: Distribuição relativa de atuadores na estrutura do robô

se a parte entrada do atuador se localiza na garra, elo, ou na base. Se ela se localizar parte móvel, esta parte deve ser recalculada para sua definição estrutural, durante o processo de inserção, eliminação e substituição do atuador específico, caso seja na base não haverá impl para o processo.

A.2.7.1 Situação relativa dos Atuadores na Estrutura do Elo de Fixação

Há basicamente duas situações importantes para os atuadores fixados nas estruturas dos elos, uma situação relativa e uma situação absoluta, definidas pela modularidade ou pelo operador. Dependendo das circunstâncias, a situação relativa expressa sua posição visando o balanceamento dinâmico, que pode ser mais eficiente dependendo do peso do atuador estar concentrado na haste **alavanca de ação**, na **haste do contrapeso** ou nos **eixos de conexão entre os elos**.

A.2.7.2 Distanciamento dos Atuadores das Juntas

O distanciamento dos atuadores das juntas, medido a partir do ponto de encaixe do atuador onde ele está fixado em porcentagem do comprimento máximo do elo. Isto é bem ilustrado na figura A.18, onde, por causa do estabelecimento dos módulos de acionamento, define-se pontos fixos, onde pode-se colocar os atuadores dentro da estrutura de cada haste do elo, são elas 45, 60, 75, e 90% da junta dos elos. Existe a opção de entrada de parâmetros generalizados definidos pelo operador conforme a necessidade da tarefa. Esta parte da programação foi elaborada para manipuladores com grau de liberdade generalizado.

para manipuladores com grau de liberdade generalizado.

A.2.7.3 Orientação dos Eixos do Sistema de Coordenadas dos Atuadores no Elo de Apoio

A seleção dos atuadores requer que os atuadores (redutores, transmissores e motores) sejam incorporados nas estruturas dos elos, a partir da garra até a base com o decorrer do processo. Para que o processo de readaptação ocorra ordenadamente, necessita-se a entrada dos parâmetros geométricos destes atuadores se realize dentro de alguns critérios de orientação, para que a readaptação dos parâmetros geométricos na estrutura se casem corretamente antes que o modelo dinâmico seja recalculado.

A entrada dos parâmetros dos atuadores através do AAMMOVISA, apresenta o sistema de coordenadas do elo de apoio ou de fixação do atuador, diz o número deste elo onde o atuador está fixado e o nome da parte do atuador da qual está sendo solicitado os parâmetros. Logo abaixo do sistema de coordenadas do elo de apoio, é apresentado um quadro de múltipla escolha que sugere os possíveis sentidos para os quais estaria apontado o eixo de saída do atuador pedido, que é o sentido do eixo Z_m do seu sistema de coordenadas, neste caso são sugeridas sete opções, uma genérica que sugere um caminho análogo aos ângulos de Euler, e seis orientações padrões simplificadas e predefinidas para agilizar o estudo, o eixo apontado **para Cima, para Baixo, à Esquerda, à Direita, Entrando no Plano XY do Elo e Saindo do Plano XY do Elo**.

Uma vez conhecido o sentido do eixo de saída do atuador na estrutura do elo, quando o atuador for instalado num daqueles seis sentidos pré-definidos na figura 2.14, aparece uma nova tela que sugere a entrada do ângulo do eixo X_m do motor com relação ao eixo X , ou então ao eixo Y do sistema de coordenadas do elo. Conforme a figura do quadro, aparece também uma outra figura que apresenta a posição e orientação do sistema de coordenadas do motor e que auxilia no enquadramento dos dados padronizando o processo. Esta orientação é a seguinte:

O centro do sistema de coordenadas do motor deve se localizar no centro da base de acoplamento do mesmo na estrutura do elo. O eixo Z_m deste sistema de coordenadas, deve ser paralelo ao eixo do motor apontado para o lado da saída deste eixo. O eixo X_m deve passar pela base e ser ortogonal ao eixo do motor e ter sentido da base para o eixo. O eixo Y_m do sistema de coordenadas do motor deve ser orientado segundo a regra da mão direita com o dedo polegar apontado para o sentido do eixo Z_m , como ilustrado pela figura A.19.

Os dados geométricos dos atuadores devem ser medidos referidos ao sistema de coordenadas do motor e na programação de adaptação serão convertidos para o sistema de coordenadas dos elos de fixação.

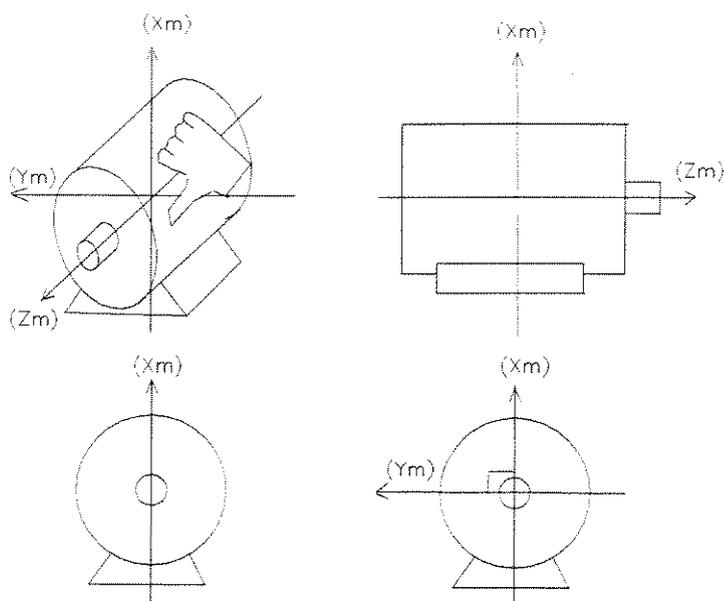


Figura A.19: Definição da orientação de atuadores

A.2.8 Geração de Arquivos para Envio de Dados

Existem basicamente três bancos de dados gerados pelo AAMMOVISA, que devem ser destacados como mostrado na seção 3.7.4, dois que enviam os parâmetros e informações sobre o comportamento cinemático do robô, da carga, das configurações de acionamento para a programação que usa o aplicativo MATHEMATICA e um banco que envia alguns destes dados e mais algumas características de controladores, motores, modelos dinâmicos do robô, *encoders*, para o aplicativo SIMULINK/MATLABTM.

A.2.8.1 Dados na Configuração MATHEMATICATM

A programação empregando o Aplicativo MATHEMATICATM é de grande importância porque resolve os três principais problemas deste trabalho, a determinação dos modelos dinâmicos algébricos e numéricos do robô frente as modificações do processo de seleção de atuadores, o processo de seleção e o processo de readaptação dos parâmetros físico geométricos.

Este banco de dados contém o nome e o valor dos parâmetros. As variáveis são passadas como vetor ou matrizes na forma de listas que devem ser limitadas por cochetes *{lista}* e cada elemento separado por vírgula.

As variáveis de junta e suas derivadas se encontram no primeiro arquivo ou banco de dados e contém uma lista de ordem $3n$ por np , onde n é o número de graus de liberdades do robô

e np é o número de pontos de amostragem considerados na simulação para o período de realização da tarefa.

As configurações de acionamento do robô e posicionamento dos atuadores, se encontram, num segundo arquivo em listas de ordem cf por na por 11, onde cf é o número de configurações submetido a análise de acionamento, na é o número de partes de atuadores analisados para o robô, e 11 é o número de parâmetros e características dos atuadores analisados.

Este segundo arquivo contém um outro elemento importante que lê a lista dos parâmetros de Denavit Hartenberg do robô, conforme especificação do fabricante ou do projetista do robô.

A.2.8.2 Dados na Configuração SIMULINK/MATLABTM

A programação empregando os Aplicativos SIMULINK/MATLABTM, objetivou a simulação de um modelo de um atuador planar articulado de três graus de liberdade, que visou o estudo do controle e do comportamento termodinâmico do robô, para verificar a influência da temperatura do motor selecionado ao seguir uma tarefa determinada.

A formação dos bancos de dados para o SIMULINKTM, foi pouco utilizada devido às limitações dos *softwares*, tais como (lentidão da operação, dificuldade de aquisição dos dados; etc).

Dos dados mais importantes contidos neste arquivo estão as **Matrizes dos Perfis Dinâmicos Específicos** e as **Matrizes dos Perfis Cinemáticos do Robô** que são calculados para uma tarefa determinada para o robô conforme projeto e simulação cinemática, e que devem servir como referências para o controle de força e de posição.

Como a programação SIMULINK/MATLABTM que resolve as equações dinâmicas, requer que lhe seja enviado também os parâmetros do robô conforme o projeto, através de um banco de dados, deve-se aproveitar esta arquivo para envio dos parâmetros dos controladores, motores, redutores, *encoder*, amplificadores e demais partes integrantes do sistema a serem definidos e lidos do projeto.

O formato dos parâmetros deste arquivo segue o padrão do ambiente do aplicativo MATLABTM.

A.3 Outros Arquivos de Apoio

Existem ou programas utilizados para fornecer informações adicionais para o processo de seleção de atuadores, ou que podem ser futuramente substitutos de alguns dos programas citados na lista de programas ou no corpo da tese. São eles, o programa ASICITRIM que tem a meta de substituir o programa AAMMOVISA realizando operações de simulações de manipuladores espaciais, e os programas APECAM, APECAR, AHOVATA, ALSIMOPLA, RAVEDI e RAVIPECI.

A.3.1 ASICITRIM - Algoritmo de Simulação Cinemática Tridimensional de Manipuladores

O ASICITRIM é um programa em fase de desenvolvimento, e quando for construído deverá substituir o programa AAMMOVISA simulando manipuladores espaciais ou tridimensionais. Ele utiliza funções semelhantes às aquelas relatadas no programa discutido anteriormente, porém com uma coordenada a mais. O ASICITRIM não foi completado, porque não foi desenvolvido um conjunto de funções necessário para resolver a cinemática inversa de manipuladores espaciais com mais de quatro graus de liberdade. Como o robô planar é suficiente, completo e genérico para gerar as provas requeridas por este processo apresentando todos os parâmetros conhecidos e possíveis de visualização, então o ASICITRIM não foi adotado para efetuar as simulações, mas poderá ser futuramente.

A.3.2 APECAM - Algoritmo de Pesquisa em Arquivos de Catalogação de Motores para Manipuladores

O programa de pesquisa em arquivos e catalogação de motores é importante dentro deste trabalho e tem a finalidade de gerar um arquivo padronizado contendo todos os dados comerciais de motores e parâmetros físico geométricos medidos em laboratório e que são essenciais para o processo de seleção de motores para robôs. Este programa foi desenvolvido utilizando-se o compilador C++ pelos princípios de programação seqüencial, mas tem-se a pretensão futura de desenvolver uma versão do mesmo utilizando programação orientada a objeto para sistema *windows*.

Entre as diversas modalidades de operações e pesquisa em arquivos executadas por este programa, destaca-se de uma forma geral, as seguintes:

1. Entrada de parâmetros de motores pelo teclado,
2. Salvamento de parâmetros de motores no final do arquivo,
3. Alteração de parâmetros específicos de um motor específico contido no arquivo,
4. Carregamento dos parâmetros de um motor específico contido no arquivo,
5. Exibição dos parâmetros de um motor específico contido no arquivo,
6. Eliminação um motor específico da lista do arquivo,
7. Inserção de um motor específico,
8. Apagar os arquivos ou catálogos,
9. Geração de catálogo de motor no padrão MATHEMATICATM.

O fator mais importante e distinto sobre este programa é a leitura dos parâmetros e dados de motores do catálogos via teclado, porque lida com dezenas de parâmetros preocupando

com a orientação dos sistemas de coordenadas do motor, como ilustrado pela figura A.19, para que o mesmo se case com perfeição com o sistema de coordenadas do seu elo de apoio ou de fixação. Os parâmetros dos motores são comerciais e técnicos, os dados técnicos podem ser específicos do estator ou rotor ou genéricos do motor tais como corrente, tensão, limites de torque e torques nominais.

A.3.2.1 Parâmetros Comerciais

Entre os dados comerciais arquivados podem ser citados nome, endereços, CEPs, telefones, e-mail e caixa postal dos fabricantes e/ou revendedores tradicionais, formas de contato e código comercial.

A.3.2.2 Parâmetros Técnicos do Motor

Os parâmetros técnicos, são os dados dinâmicos e cinemáticos dos circuitos mecânicos, elétricos, térmicos e magnéticos dos motores. Os **parâmetros mecânicos e dinâmicos do motor** são: coordenadas dos centros de massa, massas, momentos de inércia, torques, potências, taxas de potência, constante de torque, constante de motor, constante de amortecimento, número de configurações ou níveis de tensões e sensibilidade de torque. Já os **parâmetros cinemáticos** considerados no arquivo são as velocidades e acelerações angulares destes motores, nominais ou de picos.

Quanto aos **parâmetros do circuito magnéticos ou de campo** dos motores são: tensões de campo, corrente de campo e constante de força contra eletromotriz. Os **parâmetros dos circuitos elétricos** são as correntes e tensões elétricas nominais e de picos resistência da armadura. Finalmente, os dados ou **parâmetros dos circuitos térmicos** como temperaturas de operações, capacidade Térmica do rotor e estator e Coeficiente de Temperatura do rotor e estator e temperaturas máximas do ambiente de operação dos motores.

A.3.3 APECAR - Algoritmo de Pesquisa em Arquivos de Catalogação de Redutores para Manipuladores

O programa de APECAR é um programa que gera arquivo de catalogação de parâmetros de redutores sendo semelhante ao APECAM, inclusive as suas funções utilizadas para pesquisas de dados são as mesmas, mas ele difere no número de parâmetros trabalhados, que são em menor número do que para os motores, pois os redutores não possuem circuitos elétricos e magnéticos, apesar de contar com o acréscimo de dois parâmetros que são, a taxa de redução ou de acoplamento e o rendimento do redutor.

A.3.4 AHOVATA - Algoritmo para Homogeneização de Variação de Tempo de Amostragem

Na simulação dos modelos cinemáticos em linguagem C_{++} , que antecede a modelagem dinâmica e seleção de atuadores programada em ambiente MATHEMATICATM, as amostragens podem ser realizadas periodicamente ou através de intervalos de tempos variados, ou seja, não homogêneos. Entretanto, os gráficos produzidos através do MATHEMATICATM possuem abcissas igualmente espaçadas, por isto, se fossem gerados gráficos das expressões da posição, velocidade, aceleração e esforços em função do tempo através deste aplicativo utilizando-se as amostragens com variações de tempos não igualmente espaçadas, eles apresentariam distorções.

Em vista das contradições das duas situações comentadas acima, é preciso providenciar um modo de evitar as distorções das respostas, transformando os perfis de amostragens de tempo heterogêneos em perfis homogêneos. A este processo de correção, chamou-se **homogenização**. Isto é feito através de uma regressão linear para a determinação do valor estimado para cada iteração i . Assim, para cada i haverá um $t(i)$, e um $f(i) = -f(j) + [f(j) - f(i)] \frac{t(j) - t(i)}{t(j) - t(j-1)}$, isto é visivelmente ilustrado pela figura A.20.

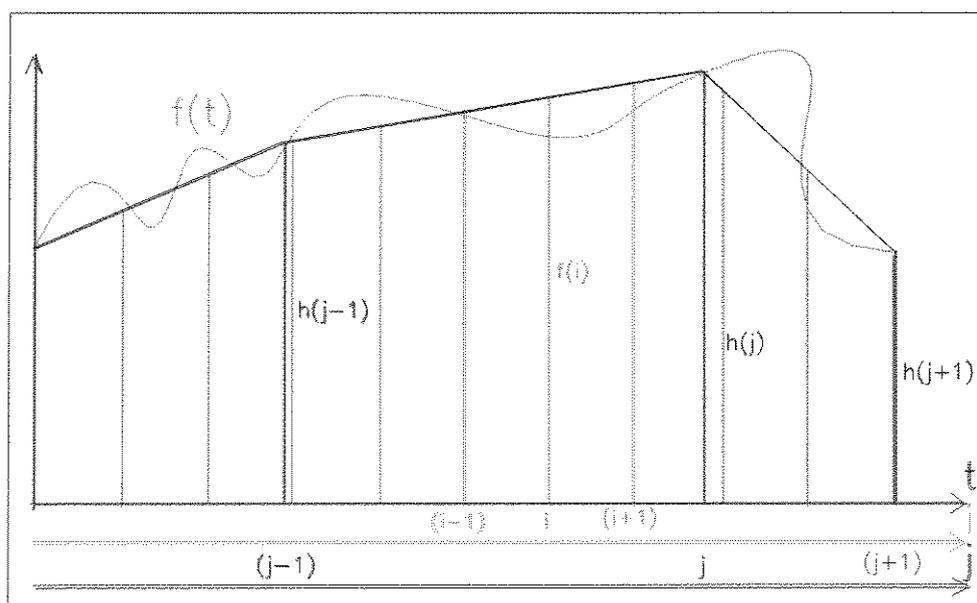


Figura A.20: Homogenização da variação do tempo de amostragem

A.3.5 ALSIMOPLA - Algoritmo com Equações Dinâmicas Não Adaptativos de um Manipulador Planar

O ALSIMOPLA é um programa que contém as equações dinâmicas de um manipulador planar é utilizado para simular o comportamento dinâmico, e controle, para confirmação e agilização

de testes de seleção de atuadores para manipuladores através dos aplicativos SIMULINK/MATLABTM. Veja mais informações e diagramas de blocos na seção 3 de [SILVA, 98e] também na lista de programas.

A.3.6 RAVEDI e RAVIPECI

Estes dois programas tem a finalidade de apresentar via vídeo de computador, os gráficos referentes respectivamente para o equacionamento dinâmico e o equacionamento cinemático em função do tempo através do aplicativo MATHEMATICA.

A.4 ATAPAMOM - Algoritmos de Teste e Arbitragem de Parâmetros para Modelagem de Manipuladores

O ATAPAMOM, cujo fluxograma geral é ilustrado pela figura A.21, é um conjunto de algoritmos primitivos, e que permitem a geração de bancos de dados e realização com parâmetros originais e alternativos referentes aos manipuladores e atuadores, permitindo também uma simulação virtual de manipuladores, para teste da geração de modelo algébrico e também a manipulação virtual de atuadores.

Na verdade, o ATAPAMOM trata-se de uma programação seqüencial composta de um programa principal que tem a função de interagir com o operador e que visa definir quais os dados que entrarão no processo de simulação do modelo dinâmico, se serão dados retidos na memória gerados e compatibilizados em programas externos como o AFICESE, contidos na memória devido a um exercício executado anteriormente, por acesso a algum banco de dados contidos num banco de dados temporário e gerado anteriormente, ou pela leitura personalizada de dados pelo teclado ou através de informações (defaults) permanente no corpo de qualquer uma das rotinas auxiliares, seja (*eq - din1o.ma*), (*eq - din2o.ma*) ou (*eq - din5o.ma*). O fluxograma ilustrado na figura A.22 ilustra de uma forma genérica os procedimentos destas três subrotinas, que são importantes para arbitragem na entrada de dados pelo operador.

Caso se opte por trabalhar com dados alternativos (motores, redutores, transmissores substituídos, inseridos, ou retirados), o ATAPAMOM permite o acesso aos bancos de dados *dad2* e *dad5* contendo parâmetros alternativos ou os coeficientes de posições relativas, ou se for necessário, os gerará através dos programas (*eq - din2o.ma*), e (*eq - din5o.ma*). Ele tem também uma rotina que efetua a compatibilização e a recomposição estrutural dos elos, que é diferente daquela propiciada pelo AFICESE. Além disto, este conjunto de programas, contém outras quatro rotinas importantes: uma que define matrizes ou máscaras que definem as posições relativas das partes dos atuadores de cada junta em cada elo, outra rotina que simula a configuração e parâmetros originais dos atuadores e do manipulador, uma outra rotina encarregada da definição da configuração e dos atuadores

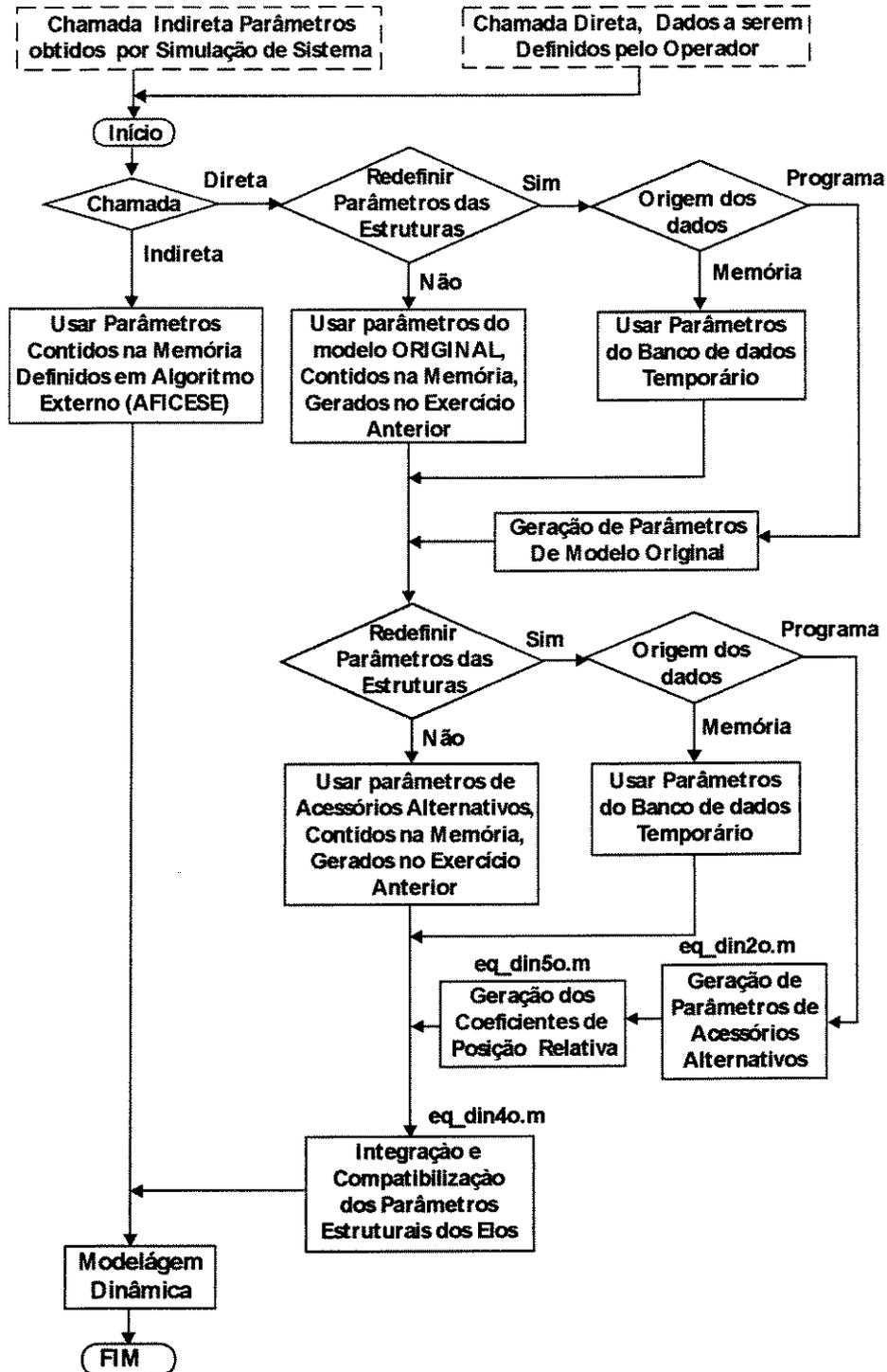


Figura A.21: Fluxograma do Corpo principal do ATAPAMOM

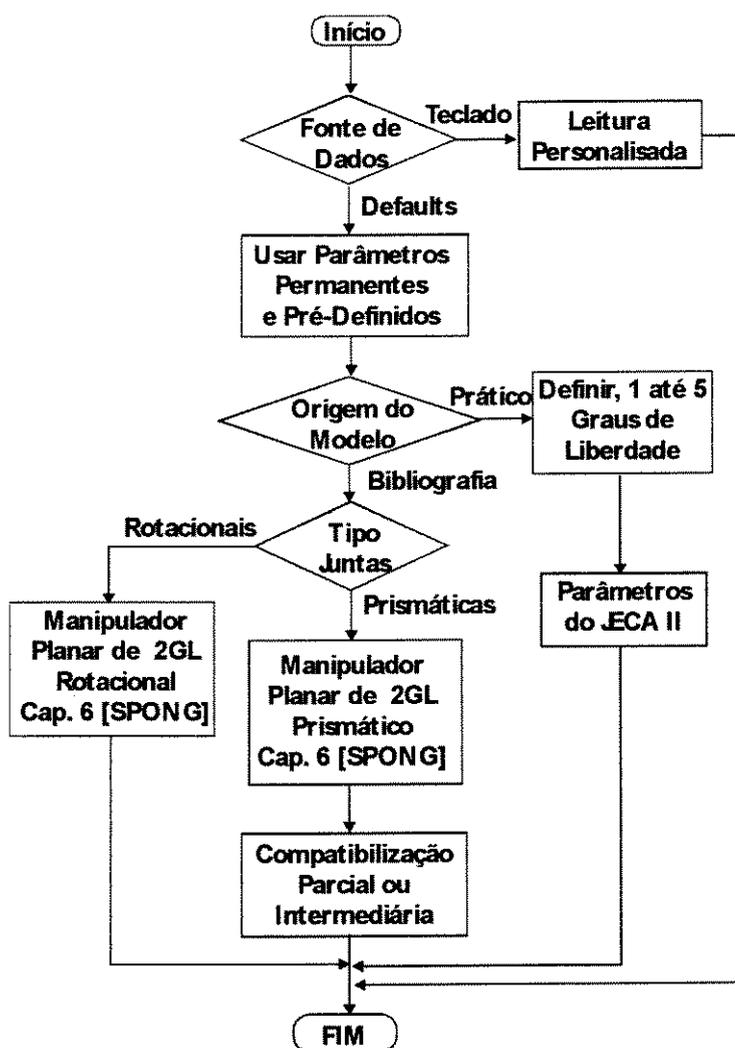


Figura A.22: Fluxograma geral de funções das rotinas auxiliares do ATAPAMOM

substitutos, inseridos ou retirados dos manipuladores, e finalmente, há uma rotina encarregada da determinação do modelo dinâmico algébrico dos manipuladores.

A.4.1 SIMOTERJU - Programa Simulação do Modelo Térmico de Juntas Robóticas

Neste outro algoritmo, foram realizados alguns esquemas de modelagem termodinâmica para realizar análise do modelo dos efeitos das mudanças de temperaturas sobre os motores de manipuladores durante a execução de algumas tarefas em algumas situações críticas. é um programa que simula o modelo termodinâmico do manipulador através do SIMULINK/MATLABTM, breves comentários também na lista de programas.

A.4.2 SIMATRIJU - Algoritmo de Simulação de Modelo Atrito de Junta Robótica

O programa SIMATRIJU é um programa que simula o modelo de atrito do manipulador espacial citado na tese também, apresentado na seção 2 de [SILVA, 98c], através do SIMULINK/MATLABTM, veja informações também na lista de programas.

A.5 Considerações Finais

Neste anexo foram estudados diversos algoritmos, que foram usados para construir toda programação que tem a finalidade de realizar a seleção de atuadores e modelagem dinâmica.

Também foram apresentados alguns algoritmos que foram utilizados para testar os programas principais, e alguns outros importantes, para a modelagem dinâmica do robô.

Assim, a efetivação de todos estes algoritmos com as características apresentadas aqui, estabelece-se o caminho para a obtenção dos resultados análise e para se tirar conclusões importantes para esta tese, ver confirmação disto nos capítulos 4 e 5.

Anexo B:

Listagens, Listas e Tabelas de Parâmetros do Processo de Seleção de Atuadores

B.1 - Listagens de dados produzidas pelo programa AAMMOVISA, contendo as informações necessárias para caracterizar o manipulador, a carga, e o ambiente e gerar a equação dinâmica dos robôs.

Listagem B.1: Banco de dados gerado pelo programa AAMMOVISA para validação e análise da adaptabilidade do programa AMODIRO.

```
elo = {{4.300000,2.600000,1.000000},{-0.500000,-0.500000,-0.100000},
{0.000000,0.000000,0.000000},{0.000000,0.000000,0.000000},
{-0.000000,0.000000,0.000000},{0.358333,0.216667,0.003333}};
g = {0,9.800000,0};
vtj = {1,1,1};
dh = {{q[1],q[2],q[3]},{0.000000,0.000000,0.000000},
{0.000000,0.000000,0.000000},{0.500000,0.500000,0.100000}};
tpamb = 25.000000;
Atu = {{{}}};
carga = {0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0};
```

Listagem B.2: Banco de dados para o AMODIRO, destacando a mudança dos centros de massa.

```
n=3;
(opção 1- centro de massa no eixo do elo )
elo = {{4.300000,2.600000,1.000000},{-0.250000,-0.250000,-0.050000},
{0.000000,0.000000,0.000000},{0.000000,0.000000,0.000000},
{0.000000,0.000000,0.000000},{0.358333,0.216667,0.003333}};
(opção 2- centro de massa no centro do elo )
elo = {{4.300000,2.600000,1.000000},{-0.500000,-0.500000,-0.100000},
{0.000000,0.000000,0.000000},{0.000000,0.000000,0.000000},
{0.000000,0.000000,0.000000},{0.358333,0.216667,0.003333}};
(opção 3- centro de massa na ponta do elo )
elo = {{4.300000,2.600000,1.000000},{0.0000,0.0000,0.0000},
{0.000000,0.000000,0.000000},{0.000000,0.000000,0.000000},
{0.000000,0.000000,0.000000},{0.358333,0.216667,0.003333}};
g = {0,9.800000,0};
vtj = {1,1,1};
dh = {{q[1],q[2],q[3]},{0.000000,0.000000,0.000000},
{0.000000,0.000000,0.000000},{0.500000,0.500000,0.100000}};
tpamb = 25.000000;
ques = {q[1],q[2],q[3],q[4]};
Atu = {{{}}};
carga = {0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0};
```

Listagem B.3: Dados para verificação da influência da mudança de posição de atuadores nos esforços das juntas.

```

n=3;

elo = {{4.300000,2.600000,1.000000},{-0.250000,-0.250000,-0.050000},
{0.000000,0.000000,0.000000},{0.000000,0.000000,0.000000},
{0.000000,0.000000,0.000000},{0.358333,0.216667,0.003333}};

g = {0,9.800000,0};

vtj = {1,1,1};

dh = {{q[1],q[2],q[3]},{0.000000,0.000000,0.000000},
{0.000000,0.000000,0.000000},{0.500000,0.500000,0.100000}};

tpamb = 2.000000;

Atu = {( opção -1, motor a 15% e redutor a 30% haste de ação)
{{-0.075,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE ,SAIR,0},
{-0.150,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE ,SAIR,0},
{-0.425,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,ELO1 ,SAIR,1},
{-0.350,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,ELO1 ,SAIR,1},
{-0.425,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,ELO2 ,SAIR,2},
{-0.350,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,ELO2 ,SAIR,2}}
};

Atu = {(opção -2, motor a 90% e redutor a 75% haste de ação)
{{-0.450,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE ,SAIR,0},
{-0.375,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE ,SAIR,0},
{-0.050,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,ELO1 ,SAIR,1},
{-0.125,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,ELO1 ,SAIR,1},
{-0.050,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,ELO2 ,SAIR,2},
{-0.125,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,ELO2 ,SAIR,2}}
};

Atu = {(opção -3, motor a 60% e redutor a 45% na haste de compensação)
{{-0.300,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE ,SAIR,0},
{-0.225,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE ,SAIR,0},
{-0.800,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA2,EXTENSAO,INDIRETO,ELO1 ,SAIR,1},
{-0.725,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA2,EXTENSAO,INDIRETO,ELO1 ,SAIR,1},
{-0.800,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA3,EXTENSAO,INDIRETO,ELO2 ,SAIR,2},
{-0.725,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA3,EXTENSAO,INDIRETO,ELO2 ,SAIR,2}} };

carga = {0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0};
    
```

Listagem B.4: Banco de dados para o AMODIRO, contendo 9 diferentes configurações de atuadores.

```

n=3;
elo = {{4.300000,2.600000,1.000000},{-0.250000,-0.250000,-0.050000},
        {0.000000,0.000000,0.000000},{0.000000,0.000000,0.000000},
        {0.000000,0.000000,0.000000},{0.358333,0.216667,0.003333}};
g = {0,9.800000,0};
vtj = {1,1,1};
dh = {{q[1],q[2],q[3]},{0.000000,0.000000,0.000000},
        {0.000000,0.000000,0.000000},{0.500000,0.500000,0.100000}};
tpamb = 25.000000;

Atu = { (Caso 1 - Manipulador tipo ( SSS-RRR-DDD-123 ))
1a {{-0.500,0.0,0.00,0.00,ROTOR,JUNTA1,HASTE,DIRETO,ELO1,SAIR,1},
     {-0.0,0.00,0.00,0.00,ESTATOR,JUNTA1,JUNTA,DIRETO,BASE,SAIR,1},
     {-0.500,0.00,0.00,0.00,ROTOR,JUNTA2,HASTE,DIRETO,ELO2,SAIR,2},
     {-0.0,0.00,0.00,0.00,ESTATOR,JUNTA2,JUNTA,DIRETO,ELO1,SAIR,2},
     {-0.10,0.00,0.00,0.00,ROTOR,JUNTA3,HASTE,DIRETO,GARRA,SAIR,3},
     {-0.000,0.00,0.00,0.00,ESTATOR,JUNTA3,JUNTA,DIRETO,ELO2,SAIR,3}}},

(Caso 2 - Manipulador tipo simples ( SSS-RRR-IDD-B23 ))
{{-0.30,0.0,0.00,0.00,MOTOR,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE,SAIR,0},
 {-0.15,0.0,0.0,0.0,REDUTOR,JUNTA1,ESFORCO,INDIRETO,BASE,SAIR,0},
 {-0.500,0.00,0.00,0.00,ROTOR,JUNTA2,HASTE,DIRETO,ELO2,SAIR,2},
 {-0.00,0.00,0.00,0.00,ESTATOR,JUNTA2,JUNTA,DIRETO,ELO1,SAIR,2},
 {-0.100,0.00,0.00,0.00,ROTOR,JUNTA3,HASTE,DIRETO,GARRA,SAIR,3},
 {-0.000,0.00,0.00,0.00,ESTATOR,JUNTA3,JUNTA,DIRETO,ELO2,SAIR,3}}},

(Caso 3 - Manipulador tipo simples ( SSS-RRR-III-B12 ))
3c {{-0.300,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE ,SAIR,0},
     {-0.150,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE ,SAIR,0},
     {-0.350,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,ELO1 ,SAIR,1},
     {-0.275,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,ELO1 ,SAIR,1},
     {-0.425,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,ELO2 ,SAIR,2},
     {-0.350,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,ELO2 ,SAIR,2}}},

(Caso 4 - Manipulador tipo simples ( SSS-RRR-III-BBB ))
4d {{-0.45,0.0,0.0,0.0,MOTOR ,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE,SAIR,0},
     {-0.225,0.0,0.0,0.0,REDUTOR,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE,SAIR,0},
     {-0.375,0.0,0.0,0.0,MOTOR ,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,BASE,SAIR,0},
     {-0.15,0.0,0.0,0.0,REDUTOR,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,BASE,SAIR,0},
     {-0.425,0.0,0.0,0.0,REDUTOR,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,ELO1,SAIR,0},
     {-0.30,0.0,0.00,0.00,MOTOR ,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,BASE,SAIR,0},
     {-0.075,0.0,0.0,0.0,REDUTOR,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,BASE,SAIR,0},
     {-0.35,0.0,0.0,0.0,REDUTOR,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,ELO1,SAIR,0},
     {-0.425,0.0,0.0,0.0,REDUTOR,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,ELO2,SAIR,0}}},

(Caso 5 - Manipulador tipo simples ( SSS-RRR-IIDB13 ))
5e {{-0.225,0.0,0.0,0.0,MOTOR ,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE,SAIR,0},
     {-0.075,0.0,0.0,0.0,REDUTOR,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE,SAIR,0},
     {-0.425,0.0,0.0,0.0,MOTOR ,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,ELO1,SAIR,1},
     {-0.35,0.0,0.0,0.0,REDUTOR,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,ELO1,SAIR,1},
     {-0.10,0.00,0.00,0.00,ROTOR,JUNTA3,HASTE,DIRETO,GARRA,SAIR,3},
     {-0.00,0.00,0.00,0.00,ESTATOR,JUNTA3,JUNTA,DIRETO,ELO2,SAIR,3}}},

```

(continua na próxima página)

Listagem B.4: Banco de dados para o AMODIRO, contendo 9 diferentes configurações de atuadores (continuação da página anterior).

```

(Caso 6 - Manipulador tipo simples ( SSS-RRR-IDI-B2B ))
6f {{-0.300,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE ,SAIR,0},
{-0.225,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE ,SAIR,0},
{-0.500,0.00,0.00,0.0,ROTOR,JUNTA2,HASTE,DIRETO,ELO2 ,SAIR,2},
{-0.000,0.00,0.00,0.0,ESTATOR,JUNTA2,JUNTA,DIRETO,ELO1,SAIR,2},
{-0.150,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,BASE ,SAIR,0},
{-0.075,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,BASE ,SAIR,0},
{-0.425,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,ELO1 ,SAIR,0},
{-0.425,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,ELO2 ,SAIR,0}},

(Caso 7 - Manipulador tipo compensado ( CCC-RRR-DII-BC1B ))
7g {{-0.50,0.0,0.0,0.0,ROTOR,JUNTA1,HASTE,DIRETO,ELO1,SAIR,0},
{-0.00,0.0,0.0,0.0,ESTATOR,JUNTA1,JUNTA,DIRETO,BASE,SAIR,2},
{-0.225,0.0,0.0,0.0,MOTOR,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,BASE,SAIR,0},
{-0.15,0.0,0.0,0.0,REDUTOR,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,BASE,SAIR,0},
{-0.425,0.0,0.0,0.0,REDUTOR,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,ELO1,SAIR,0},
{-0.8,0.0,0.0,0.0,MOTOR,JUNTA3,EXTENSAO,INDIRETO,ELO1,SAIR,1},
{-0.35,0.0,0.0,0.0,REDUTOR,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,ELO1,SAIR,1},
{-0.275,0.0,0.0,0.0,REDUTOR,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,ELO2,SAIR,1}},

(Caso 8 - Manipulador tipo compensado ( CCC-RRR-DII-1C1C2 ))
8h {{-0.5,0.00,0.00,0.00,ROTOR,JUNTA1,HASTE,DIRETO,ELO1,SAIR,1},
{-0.0,0.00,0.00,0.00,ESTATOR,JUNTA1,JUNTA,DIRETO,BASE,SAIR,1},
{-0.8,0.0,0.0,0.0,MOTOR,JUNTA2,EXTENSAO,INDIRETO,ELO1,SAIR,1},
{-0.275,0.0,0.0,0.0,REDUTOR,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,ELO1,SAIR,1},
{-0.725,0.0,0.0,0.0,MOTOR,JUNTA3,EXTENSAO,INDIRETO,ELO2,SAIR,2},
{-0.35,0.0,0.00,0.00,REDUTOR,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,ELO2,SAIR,2}}
    
```

Listagem B.5: Banco usado pelo AMODIRO, para análise das sensibilidade da modelagem dinâmica aos diversos algoritmos de determinação do perfis cinemáticos.

```

N=3;

elo = {{4.300000,2.600000,1.000000},{-0.250000,-0.250000,-0.050000},
        {0.000000,0.000000,0.000000},{0.000000,0.000000,0.000000},
        {0.000000,0.000000,0.000000},{0.358333,0.216667,0.003333}};
g = {0,9.800000,0};

vtj = {1,1,1};

dh = {{q[1],q[2],q[3]},{0.000000,0.000000,0.000000},
        {0.000000,0.000000,0.000000},{0.500000,0.500000,0.100000}};

tpamb = 25.000000;

Atu = {{{}}};

carga = {0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0};
    
```

Listagem B.6: Banco de dados com condições do manipulador, visando análise das diversas formas de modelagens dinâmicas empregadas.

```

n=3;

elo = {{4.300000,2.600000,1.000000},{-0.000,-0.000,-0.000},
       {0.000000,0.000000,0.000000},{0.000000,0.000000,0.000000},
       {0.000000,0.000000,0.000000},{0.358333,0.216667,0.003333}};

g = {0,9.800000,0};

vtj = {1,1,1};

dh = {{q[1],q[2],q[3]},{0.000000,0.000000,0.000000},
      {0.000000,0.000000,0.000000},{0.500000,0.500000,0.100000}};

tpamb = 25.000000;

Atu = { ( Acionamento indireto, manipulador tipo SSS-RRR-DDD-123 )
1a{{-0.500,0.0,0.00,0.00,ROTOR,JUNTA1,HASTE,DIRETO,ELO1,SAIR,1},
{-0.0,0.00,0.00,0.00,ESTATOR,JUNTA1,JUNTA,DIRETO,BASE,SAIR,1},
{-0.500,0.00,0.00,0.00,ROTOR,JUNTA2,HASTE,DIRETO,ELO2,SAIR,2},
{-0.0,0.00,0.00,0.00,ESTATOR,JUNTA2,JUNTA,DIRETO,ELO1,SAIR,2},
{-0.10,0.00,0.00,0.00,ROTOR,JUNTA3,HASTE,DIRETO,GARRA,SAIR,3},
{-0.000,0.00,0.00,0.00,ESTATOR,JUNTA3,JUNTA,DIRETO,ELO2,SAIR,3}},

( Acionamento indireto, manipulador tipo SSS-RRR-III-B12 )
{{-0.300,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE ,SAIR,0},
{-0.150,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE ,SAIR,0},
{-0.350,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,ELO1 ,SAIR,1},
{-0.275,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,ELO1 ,SAIR,1},
{-0.425,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,ELO2 ,SAIR,2},
{-0.350,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,ELO2 ,SAIR,2}}
};

carga = {0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0};

```

Listagem B.7: Dados para análise da alteração da carga ou dos esforços externos na garra.

```

N=3;

elo = {{4.300000,2.600000,1.000000},{-0.250000,-0.250000,-0.050000},
      {0.000000,0.000000,0.000000},{0.000000,0.000000,0.000000},
      {0.000000,0.000000,0.000000},{0.358333,0.216667,0.003333}};

g = {0,9.800000,0};

vtj = {1,1,1};

dh = {{q[1],q[2],q[3]},{0.000000,0.000000,0.000000},
      {0.000000,0.000000,0.000000},{0.500000,0.500000,0.100000}};

tpamb = 25.000000;

Atu = {
(Configuração de Acionamento Tipo SSS-RRR-DDD-123)
1a) {{-0.500,0.0,0.00,0.00,ROTOR,JUNTA1,HASTE,DIRETO,ELO1,SAIR,1},
     {-0.0,0.00,0.00,0.00,ESTATOR,JUNTA1,JUNTA,DIRETO,BASE,SAIR,1},
     {-0.500,0.00,0.00,0.00,ROTOR,JUNTA2,HASTE,DIRETO,ELO2,SAIR,2},
     {-0.0,0.00,0.00,0.00,ESTATOR,JUNTA2,JUNTA,DIRETO,ELO1,SAIR,2},
     {-0.10,0.00,0.00,0.00,ROTOR,JUNTA3,HASTE,DIRETO,GARRA,SAIR,3},
     {-0.000,0.00,0.00,0.00,ESTATOR,JUNTA3,JUNTA,DIRETO,ELO2,SAIR,3}}

(Configuração de acionamento tipo SSS-RRR-III-B12)
3c) {{-0.300,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE ,SAIR,0},
     {-0.150,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA1,HASTE,INDIRETO,BASE ,SAIR,0},
     {-0.350,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,ELO1 ,SAIR,1},
     {-0.275,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA2,HASTE,INDIRETO,ELO1 ,SAIR,1},
     {-0.425,0.00,0.00,0.0, MOTOR ,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,ELO2 ,SAIR,2},
     {-0.350,0.00,0.00,0.0,REDUTOR,JUNTA3,HASTE,INDIRETO,ELO2 ,SAIR,2}}};

Opção 1) carga = {0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0};

Opção 2) carga = {0.0,0.0,0.0,0.22,0.0,0.0,0.0123};

```


Lista B.3: Características de carga e do motor, fixadas para análise dos parâmetros de seleção de atuadores.

Viscosidade da carga	$B_c = 1.75$ [Nm/(rad/s)]
Momento de inércia da carga	$J_c = 175$ [Nm/(rad/s/s)]
Torque de perturbação da carga	$T_{ext} = 350$ [Nm]
Velocidade da carga	$\omega = 4.0$ [rad/s]
Aceleração da carga	$\alpha = 0.7$ [rad/s/s]
Rendimento do acoplamento	$\eta = 0.8$
Viscosidade do rotor do motor	$B_m = 0.20$ [Nm/(rad/s)]
Momento de inércia do rotor	$J_m = 0.4$ [Nm/(rad/s/s)]

Lista B.4: Condições e características do motor, fixadas para análise dos parâmetros de seleção de atuadores.

Temperatura Ambiente	$\Phi_a = 85.0$ [oC]
Temperat. Máxima	$\Phi_m = 135$ [oC]
Constante de torque	$k_t = 342$ [Nm/A]
Resistência Térmica	$R_\theta = 1.75$ [W/oC]
Resistência elétrica	$R_a = 3.2$ [Ohms]
Corrente de pico	$I_p = 14.0$ [Amperes]
Momento de Inércia	$J_m = 0.4$ [Nm/(rad/s/s)]

Lista B.5: Simbologia das abreviaturas dos parâmetros de motores.

TorqNom	torque nominal
TorqMax	torque máximo
MasRot	massa do rotor
CeMasRx	centro massa do rotor relativa a coordenada x do SC do motor
CeMasRy	centro massa do rotor relativa a coordenada y do SC do motor
CeMasRz	centro massa do rotor relativa a coordenada z do SC do motor
Obs:	<i>SC_m = sistema de coordenadas do motor. O eixo z e paralelo ao eixo do rotor e o eixo x que vai do centro do SC_m que fica no ponto de contato com a estrutura do elo onde se fixa para o eixo do rotor, e o eixo y e determinado pela regra da mão direita, com o polegar apontando para o eixo z deste SC_m</i>
JeixoR	Inércia do rotor em torno do seu eixo
JnercRx	Inércia do rotor em torno do eixo x do SC paralelo ao SC _m no Centro de Massa
JnercRy	Inércia do rotor em torno do eixo y do SC paralelo ao SC _m no Centro de Massa
JnercRz	Inércia do rotor em torno do eixo z do SC paralelo ao SC _m no Centro de Massa
AcelNom	Aceleração nominal do motor
AcelMax	aceleração máxima do motor
VelNom	velocidade nominal do motor
VelMax	velocidade máxima do motor
PotNom	potência nominal
PotMax	potência máxima
TxPtNom	taxa ou derivada de potência nominal
TxPtmax	taxa ou derivada de potência máxima
CapTeRt	capacidade térmica do rotor
coefTR	coeficiente de temperatura do rotor
RenNom	rendimento nominal do motor
ViscMot	viscosidade do motor
TempNom	temperatura de operação nominal do motor
TempMax	temperatura de operação máxima do motor

Lista B.5: Abreviaturas, nomes, e características dos parâmetros de motores exigidas ou recomendadas para o processo de seleção de atuadores (**continuação**).

NroMot	número do motor
Torqbl	torque de bloqueio
MasEst	Massa do estator
CeMasEx	centro de massa do estator relativo a coordenada z do SC do motor
CeMasEy	centro de massa do estator relativo a coordenada z do SC do motor
CeMasEz	centro de massa do estator relativo a coordenada z do SC do motor
JeixoE	Inércia do estator em torno do seu eixo
JnrcEx	Inércia do estator em torno do eixo x do SC paralelo ao SCm no Centro de Massa
JnrcEy	Inércia do estator em torno do eixo x do SC paralelo ao SCm no Centro de Massa
JnrcEz	Inércia do estator em torno do eixo x do SC paralelo ao SCm no Centro de Massa
NrTap	Número de Taps (DE TOLERÂNCIAS) (Nr de Parametros = Np) Na resposta tolerância escolhida
Obs:	<i>Os seis parâmetros abaixo serão lidos NrTaps vezes conforme o número de taps (tolerância possíveis no catalogo) do motor ou níveis de tensões</i>
ResArm	Resistência elétrica da armadura
LaArmad	Indutância do enrolamento da armadura
CorMax	corrente máxima do motor
TenMax	tensão máxima do enrolamento da armadura do motor
Kfcem	constante de força contra eletromotriz do motor
SenTorq	sensibilidade de torque
CorNom	corrente nominal do motor
CorCamp	corrente do enrolamento de campo
TenNom	tensão nominal do enrolamento da armadura do motor
TenCamp	tensão do enrolamento de campo
RaioMot	Raio Máximo do Motor
CompMax	Comprimento Máximo do Motor
CapTEst	capacidade térmica do estator
coefTE	coeficiente de temperatura do estator
KEleMot	Constante Elétrica do Motor
KMecMot	Constante Mecânica do Motor
U\$Motor	Custo Médio do Motor no Mercado
RefExtM	Referencias Externa do Motor em Catálogos
Obs:	<i>RefExtM e um real com forma xx.yzzzz onde xx e o número do catalogo onde se encontra, yy e o número da linha, e zzzz e o número da pagina do catalogo, onde se encontra.</i>
Codigo	código comercial do motor
City	cidade do fabricante ou representante
Tipo	tipo do motor
NrSer	número de serie do motor
Rua	rua do representante ou fabricante
Cep	cep do representate
Fone	Nro de telefone do representante
Nome	nome do representane
Fabrica	nome do fabricante

B.3 - Tabelas de Informações sobre os Motores

Tabela B.1: Parâmetros Importantes de um motor para o processo de seleção.

Ordem	Variável de identificação	Abreviatura do Parâmetro	Unidade no SI	Valor do parâmetro
01	tnr	TorqNom	Nm	6.54
02	tnr	TorqMax	Nm	234.
03	mr	MasRot	g	0.173
04	cxr	CeMasRx	m	0.023
05	cyr	CeMasRy	m	0.023
06	czr	CeMasRz	m	0.023
07	jer	JeixoR	Nm .s ² /2	1.53
08	jxr	JnercRx	Nm .s ² /2	0.0987
09	jyr	JnercRy	Nm .s ² /2	0.0987
10	jzr	JnercRz	Nm .s ² /2	0.567
11	anr	AcelNom	rad/s ²	0.123
12	amr	AcelMax	rad/s ²	0.0987
13	vnr	VelNom	rad/s	0.321
14	vmr	VelMax	rad/s	0.432
15	pnr	PotNom	W	123.760002
16	pmr	PotMax	W	134.979996
17	tpn	TxPtNom	W/s	123432.890625
18	tpm	TxPtmax	W/s	2.20000075
19	Ctr	CapTeRt	W.s ^o C	0.9876
20	ctr	coefTR	m ³ /°C	0.00876
21	ren	RenNom	—	0.987
22	bmt	ViscMot	Nm.s/rad	0.00125
23	tno	TempNom	°C	64.
24	tmo	TempMax	°C	75.
25	nro	NroMot	—	6.
26	tbr	Torqbl	Nm	23.
27	me	MasEst	g	0.345
28	cxe	CeMasEx	m	0.123
29	cve	CeMasEy	m	1.
30	cye	CeMasEz	m	1.
31	jee	JeixoE	Nm .s ² /2	2.244
32	jex	JnercEx	Nm .s ² /2	1.
33	jey	JnercEy	Nm .s ² /2	1.
34	jez	JnercEz	Nm .s ² /2	1.
35	tap	NroTaps	—	5.
36	ram	ResArm	Ω	{0.9, 1.3, 2.1, 3.2, 5.2, 8.2 }
37	lam	LaArmad	mH	{1.7, 2.3, 4.0, 6.1, 10, 16 }
38	imn	CorMax	A	{26.8,22.6,14.3,14.0,10.9,8.7 }
39	vmp	TenMax	V	{24.1,29.4,36.4,49.4,56.9,71.3 }
40	kfc	Kfcem	V.s/rad	{1.27,1.50,1.96,2.42,3.11,3.92 }
41	sdt	Sentorq	Nm/A	{179, 212, 277, 342, 440, 554 }
42	inm	CorNom	A	2.1223
43	ifm	CorCamp	A	1.
44	vnm	TenNom	V	1.
45	vfm	TenCamp	V	1.
46	rai	RaioMax	Ω	0.23
47	lnt	LargMot	mH	0.18
48	Cte	CapTEst	W.s ^o C	1.
49	cte	coefTE	m ³ /°C	1.
50	ktm	Ktornec	V.s ² /rad	1.
51	Rt	Resterm	°C/W	1.
52	cum	U\$Motor	—	50.34
53	rfm	RefExtM	—	20.4012

Tabela B.2: Valores e nomes de alguns parâmetros típicos do processo de seleção de atuadores obtidos para as diversas estratégias.

Parâmetro do processo de seleção	Símbolo	Valor	Unidade
torque de carga externo. eficaz	TEe	31.8332	Nm
torque de carga inercial. eficaz	Tle	1.2715	Nm
inércia de carga eficaz	JLe	3.33274	Nm s ² /rad
aceleração de carga eficaz	JECAe	0.38319	rad/s ²
torque de carga externa. médio	TEm	-20.1271	Nm
torque de carga inercial. médio	TIm	0.101627	Nm
inércia de carga eficaz	JLm	3.26932	Nm s ² /rad
aceleração de carga médio	JECAm	-0.02822	rad/s ²
aceleração de carga máxima	AP	0.822	rad/s ²
torque de carga externa. máximo	TEP	51.5069	Nm
inércia de carga máxima	INP	4.37009	Nm s ² /rad
torque de carga externa. máximo	TIP	3.59222	Nm
Torq de motor referido carga (virtual)	TMC	0.0579325	Nm
Torque total de pico	TC	23.7293	Nm
torque carga para torque total. máximo	TCX	-36.4414	Nm
torque motor para torque total máximo	TMCX	-0.0515899	Nm
taxa redução para otimização de carga	NX	52.8364	W/s
ordem do torque de pico total	iter	20	s
variação do tempo	dt	0.102	s
Período da simulação	t	5.1	s
media do produto de torque	MPT	24.5817	Nm
torque de carga eficaz	TCE	32.5097	Nm
torque de motor referido a carga eficaz	TMCE	0.02888	Nm
torque total eficaz ao quadrado	TTEQ	4.49016	Nm
Off-se da taxa de aquecimento	AL	3.19219	W/s
Off-set da taxa de potência	FG	1.29796	W/s
Grau de acoplamento	GN	1.2105	---
fator de aquecimento	HA	1.92085	---
taxa redução para otimização. para aquecimento	NA	36.3913	W/s
Taxa de redução para a estratégia JECA Torque Pico	NP	32.9275	W/s
Taxa de redução para a estratégia SHNEY-I Torque Pico	NP2	32.9275	W/s
Torque de carga de Pico para a estratégia JECA	TPL	3.93729	Nm
Torque de carga de Pico para a estratégia SHNEY-I	TPL2	3.93729	Nm
Potência de carga de Pico para a estratégia JECA	PPL	213.136	W
Potência de carga de Pico para a estratégia SHNEY-I	PPL2	213.136	W
Taxa de redução Inercial	NI	8.40751	W/s
Torque total eficaz - JECA	Ttef	31.9171	Nm
Torque total eficaz - SHNEY-I	Ttef2	31.7943	Nm
Torque total eficaz - SHNEY-II	Ttef3	32.454	Nm
Taxa de redução de aquecimento	NH	36.7051	W/s
Taxa de redução de aquecimento	NH2	36.6344	W/s
Taxa de redução de aquecimento	NH3	34.0125	W/s
torque de carga externa. eficaz	TEe	31.8332	Nm
torque de carga inercial. eficaz	Tle	1.2715	Nm
inércia de carga eficaz	JLe	3.33274	Nm s ² /rad
aceleração de carga eficaz	JECAe	0.38319	rad/s ²
torque de carga externa. médio	TEm	-20.1271	Nm

(continua na próxima página)

Tabela B.2: Valores e nomes de alguns parâmetros típicos do processo de seleção de atuadores obtidos para as diversas estratégias (continuação da página anterior).

Parâmetro do processo de seleção	Símbolo	Valor	Unidade
torque de carga inercial. médio	TIm	0.101627	Nm
inércia de carga eficaz	JLm	3.26932	Nm s ² /rad
aceleração de carga médio	JECAm	-0.02822	rad/s ²
aceleração de carga máxima	AP	0.822	rad/s ²
torque de carga externa. máximo	TEP	51.5069	Nm
inércia de carga máxima	INP	4.37009	Nm s ² /rad
torque de carga externa. máximo	TIP	3.59222	Nm
torque de carga externa. médio	TEMm	0.478466	Nm
torque de carga inercial. médio	TIMm	0.0344253	Nm
torque de carga externa. médio	TIEm	19.1452	Nm
Taxa de aquecimento de acoplamento mínima estratégia SIMUL	Pamg	78.5908	W/s
Taxa de aquecimento de acoplamento mínima estratégia JECA	Pam	30.1197	W/s
Taxa de aquecimento de acoplamento mínima estratégia SHNEY-I	Pam2	29.9962	W/s
Taxa de aquecimento de acoplamento mínima estratégia SHNEY-I I	Pam3	45.8533	W/s
Taxa de potência de acoplamento mínima estratégia SIMUL	Pcmg	178.235	W/s
Taxa de potência de acoplamento mínima estratégia JECA	Pcm	213.136	W/s
Taxa de potência de acoplamento mínima estratégia SHNEY-I	Pcm2	213.136	W/s
Taxa de potência de acoplamento mínima estratégia SHNEY-I I	Pcm3	213.136	W/s
Torque de acoplamento mínimo estratégia SIMUL	TNG	3.60052	Nm
Torque de acoplamento mínimo estratégia JECA	TPL	3.93729	Nm
Torque de acoplamento mínimo estratégia SHNEY-I	TPL2	3.93729	Nm
Taxa de redução para carga mínima estratégia SIMUL	NX	52.8364	W/s
Taxa de redução para carga mínima estratégia JECA	NP	32.9275	W/s
Taxa de redução para carga mínima estratégia SHNEY-I	NP2	32.9275	W/s
Taxa de aquecimento para carga mínima estratégia SIMUL	NA	36.3913	W/s
Taxa de aquecimento para carga mínima estratégia JECA	NH	36.7051	W/s
Taxa de aquecimento para carga mínima estratégia SHNEY-I	NH2	36.6344	W/s
Taxa de aquecimento para carga mínima estratégia SHNEY-I I	NH3	34.0125	W/s