

**CARLOS HENRIQUE FARIAS DOS SANTOS**

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE EM  
CASCATA DE UM ROBÔ MANIPULADOR  
HIDRÁULICO**

Florianópolis  
2002.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE EM  
CASCATA DE UM ROBÔ MANIPULADOR  
HIDRÁULICO**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

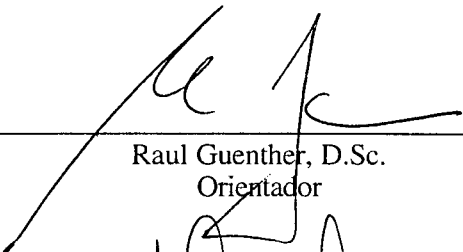
**CARLOS HENRIQUE FARIAS DOS SANTOS**

Florianópolis, março de 2002.

# MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE EM CASCATA DE UM ROBÔ MANIPULADOR HIDRÁULICO

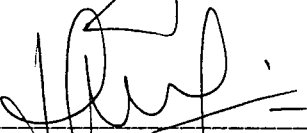
Carlos Henrique Farias dos Santos

'Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Controle, Automação e Informática Industrial, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.'



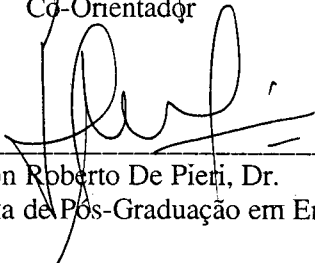
---

Raul Guenther, D.Sc.  
Orientador



---

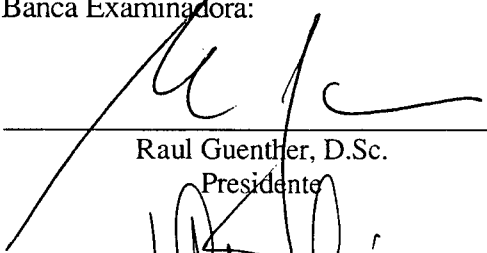
Edson Roberto De Pieri, Dr.  
Co-Orientador



---

Edson Roberto De Pieri, Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



---

Raul Guenther, D.Sc.  
Presidente



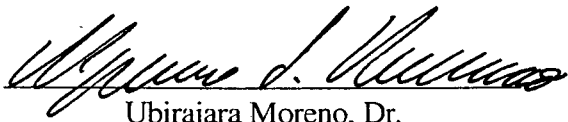
---

Victor Juliano De Negri, Dr.



---

Edson Roberto De Pieri, Dr.  
Co-Orientador



---

Ubirajara Moreno, Dr.



---

Eugênio de Bona Castelan Neto, Dr.

*As mãs árduas lutas são travadas por aquele que se empenha em vencer a si mesmo.*

*Aos meus pais,  
Divaldo e Lígia.*

*À minha irmã,  
Lygia Karla.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Diraldo Rodrigues dos Santos e Lígia Farias dos Santos e minha irmã Lígia Karla pelo incansável apoio, estímulo, compreensão e amor demonstrados em todos os momentos desta caminhada.

À Carolina Percinotti por seu carinho, motivação e amor.

À minha família pela consideração e respeito.

Ao meu avô materno Walfredo Costa Farias (*In Memoriam*) e minha tia Lourdes (*In Memoriam*) que sempre me instruíram, incentivaram e acreditaram em minha capacidade e perseverança.

Aos professores Raul Guenther e Edson Roberto De Pieri pela orientação e amizade demonstrada durante a realização deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora pela participação, comentários, críticas e sugestões feitos a este trabalho.

Aos amigos Henrique Simas, Daniel Martins, Raimundo Ricardo, João Linhares, Otacílio Almeida, Felipe Cunha e Eduardo Perondi pela amizade e companheirismo demonstrados nos últimos anos.

Aos grandes amigos Rodrigo Rodrigues Sumar, Javier Trivenho Vargas, Alexandre Campos e Antônio Carlos Valdiero que estiveram presentes nos momentos mais importantes desta jornada.

A todas aquelas pessoas que não estão explicitamente incluídas, mas que de alguma forma contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	ix
RESUMO .....	xi
ABSTRACT .....	xii
1. INTRODUÇÃO .....	1
RESUMO	
1.1 A Importância dos Robôs Hidráulicos .....	1
1.2 O Problema de Controle dos Robôs Hidráulicos .....	2
1.2.1 Vazões das Válvulas .....	2
1.2.2 Compressibilidade .....	2
1.2.3 Variações Paramétricas .....	3
1.2.4 Atrito .....	3
1.2.5 Zona-morta .....	4
1.3 Algumas Propostas de Solução .....	4
1.3.1 Propostas Incluindo a Compensação do Atrito .....	5
1.3.2 Propostas Incluindo a Compensação da Zona-morta .....	6
1.3.3 Propostas para Contornar as Incertezas Paramétricas .....	7
1.4 Organização deste Texto .....	9
2. MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM ROBÔ HIDRÁULICO .....	10
RESUMO	
2.1 Introdução .....	10
2.2 Modelagem Cinemática .....	10
2.2.1 Metodologia Geométrica Proposta .....	11
2.2.2 Cinemática Diferencial .....	15
2.3 Modelagem do Subsistema Mecânico .....	16
2.4 Modelagem do Subsistema Hidráulico .....	18
2.5 Considerações sobre o Modelo .....	23
2.5.1 Dinâmica das Válvulas .....	23



2.5.2 Dinâmica das Tubulações .....	23
2.5.3 Módulo de Elasticidade Volumétrica .....	24
2.5.4 Atrito .....	24
2.6 O Robô Hidráulico como um Sistema Interconectado .....	24
2.7 Conclusões .....	25
3. CONTROLE EM CASCATA .....	27
RESUMO	
3.1 Introdução .....	27
3.2 Controle Clássico .....	28
3.3 A Técnica de Controle em Cascata .....	29
3.4 O Controle em Cascata Aplicado ao Robô Hidráulico .....	32
3.4.1 Seguimento no Subsistema Mecânico .....	33
3.4.2 Seguimento no Subsistema Hidráulico .....	34
3.5 Análise de Estabilidade do Controlador em Cascata .....	36
3.6 Conclusões .....	40
4. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES .....	41
RESUMO	
4.1 Introdução .....	41
4.2 Especificação do Modelo para Simulação .....	42
4.3 Geração de Trajetórias .....	45
4.4 Resultados das Simulações .....	53
4.4.1 Simulações com o Controlador Nominal .....	53
4.4.2 Simulações com Incertezas no Sistema .....	56
4.5 Conclusões .....	65
5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS .....	66
APÊNDICE A .....	68
APÊNDICE B .....	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	107

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 Robô de juntas rotativas com seus elos acionados por atuadores lineares.
- Figura 2.2 Localização do atuador  $i$  para efeito das deduções geométricas.
- Figura 2.3 Triângulo para a dedução da relação geométrica entre  $y_i$  e  $\Theta$ .
- Figura 2.4 Atuador Hidráulico.
- Figura 2.5 Interpretação de subsistemas interconectados para o robô hidráulico.
- Figura 3.1 Diagrama de blocos do controlador PD para o robô hidráulico.
- Figura 3.2 Diagrama de blocos do controlador PID para o robô hidráulico.
- Figura 3.3 Estrutura de um sistema em cascata
- Figura 3.4 Diagrama de blocos do controlador em cascata
- Figura 4.1 Manipulador Hidráulico com dois graus de liberdade
- Figura 4.2 Posições (m) – (a), velocidades (m/s) – (b), acelerações - (m/s<sup>2</sup>) e derivada das acelerações (m/s<sup>3</sup>) desejadas no espaço da tarefa.
- Figura 4.3 Trajetória desejada
- Figura 4.4 Trajetórias –(a), velocidades – (b), acelerações – (c) e Jerk's das juntas- (d).
- Figura 4.5 Trajetórias – (a), velocidades – (b), acelerações – (c) e Jerk's dos atuadores- (d).
- Figura 4.6 Trajetória do efetuator final
- Figura 4.7 Erro de seguimento de trajetória do efetuator final.
- Figura 4.8 Esforço de controle: Controle em cascata – (a); PID – (b).
- Figura 4.9 Trajetória no espaço da tarefa diante de +50% de  $\beta$
- Figura 4.10 Erro de posição no espaço da tarefa diante de +50% de  $\beta$
- Figura 4.11 Esforços de controle diante de +50% de  $\beta$  (a) - CC (b) – PID.
- Figura 4.12 Trajetória no espaço da tarefa diante de -50% de  $\beta$ .
- Figura 4.13 Erro de posição no espaço da tarefa diante de -50% de  $\beta$
- Figura 4.14 Esforços de controle diante de -50% de  $\beta$  (a) - CC (b) – PID.
- Figura 4.15 Trajetória diante de incerteza de +3 kg na carga do segundo elo.
- Figura 4.16 Erro de trajetória diante de incerteza de +3 kg na massa do segundo elo.

- Figura 4.17 Esforços de controle diante de + 3kg na massa do 2º elo. (a) - CC (b) - PID.
- Figura 4.18 Trajetória no espaço da tarefa, com ajuste, diante da incerteza (CC).
- Figura 4.19 Erro de posição no espaço da tarefa, com ajuste, diante da incerteza (CC).
- Figura 4.20 Esforço de controle, com ajuste, diante da incerteza (CC).
- Figura 4.21 Trajetória no espaço da tarefa diante da perturbação (PID).
- Figura 4.22 Erro de posição no espaço da tarefa diante de perturbação (PID).
- Figura 4.23 Esforço de controle diante de perturbação (PID).
- Figura A.1 Interface do simulador.
- Figura A.2 Modelo do robô hidráulico
- Figura A.3 Subsistema mecânico
- Figura A.4 Diagrama de blocos do subsistema hidráulico
- Figura A.5 Organização do subsistema hidráulico do atuador 1.
- Figura A.6 Variação da pressão na câmara 1 do atuador 1.
- Figura A.7 Vazão na câmara 1.
- Figura A.8 Cálculo da força hidráulica.
- Figura A.9 Mapeamento cinemático de um robô.
- Figura A.10 Gerador de trajetórias.
- Figura A.11 Diagrama de blocos para geração do espaço da tarefa.
- Figura A.12 Geração do espaço das juntas.
- Figura A.13 Geração do espaço dos atuadores.
- Figura A.15 Constituição do controlador em cascata.
- Figura A.16 Diagrama para o cálculo das referências e erros de seguimento.
- Figura A.17 Diagrama para o cálculo da força hidráulica e de sua 1ª derivada.
- Figura A.18 Diagrama de implementação da lei de controle do subsistema hidráulico.
- Figura A.19 Cálculo da função não-linear  $\hat{E}_1(q, p, \text{sign}(\hat{u}))$ .
- Figura A.20 Cálculo da função não-linear  $g_1(p_1, \text{sign}(x_v))$
- Figura B.1 Triângulos para a obtenção da componente gravitacional do atuador  $i$ .
- Figura B.2 Robô de juntas rotativas com seus elos acionados por atuadores lineares.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE EM CASCATA DE UM ROBÔ MANIPULADOR HIDRÁULICO**

**Carlos Henrique Farias dos Santos**

Março/2002

Orientador: Raul Guenther, D.Sc.

Co-Orientador: Edson Roberto De Pieri, Dr.

Área de Concentração: Controle, Automação e Informática Industrial

Palavras chave: manipulador hidráulico, atuador hidráulico, controle em cascata.

Número de Páginas: 111.

Neste trabalho, apresentam-se a modelagem e o controle em cascata de um manipulador hidráulico de dois graus de liberdade. Baseando-se em estudos de robôs industriais, em várias aplicações com manipulação de cargas pesadas, torna-se atrativa a utilização de manipuladores hidráulicos, devido as suas características de excelente relação torque/dimensão, resposta rápida e alta durabilidade, confirmando assim sua importância na automação flexível. Por outro lado, estes sistemas possuem características dinâmicas não-lineares e são relativamente difíceis de controlar. As não-linearidades são associadas à compressibilidade do fluido hidráulico e as complexas características da vazão da válvula. O controle clássico PID possui simplicidade e facilidade de implementação, porém diante de tais não-lineares, a resposta do sistema pode não alcançar o desempenho desejado. Com o objetivo de superar as limitações impostas pelos controladores clássicos, propõe-se uma metodologia de controle em cascata que consiste em dividir o sistema em dois subsistemas: o hidráulico e o mecânico. E a partir dos resultados das simulações conclui-se que o controle em cascata apresenta um melhor desempenho quando comparado aos controladores clássicos.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **MODELING, SIMULATION AND CASCADE CONTROL OF A HYDRAULIC ROBOT MANIPULATOR**

**Carlos Henrique Farias dos Santos**

March/2002

Advisor: Raul Guenther, D.Sc.

Co-Advisor: Edson Roberto De Pieri, Dr.

Area of Concentration: Control, Automation and Industrial Informatics.

Keywords: Hydraulic Manipulators, Hydraulic Actuators, Cascade Control.

Number of Pages: 111.

In this work, there are presented the modeling and the cascade control of a hydraulic manipulator of two degrees of freedom. Being based on studies of the industrial robots, in some applications with weighed load manipulation, the use of hydraulic manipulators becomes attractive, had its features of excellent relation torque/mass, fast reply and high durability, thus confirming its importance in the flexible automation. On the other hand, these systems possess nonlinear dynamic features and are relatively difficult to control. The nonlinearities are associates the compressibility of the hydraulical fluid and the characteristic complex of the outflow of the valve. Classic control PID possess simplicity and easiness of implementation, however ahead of the nonlinear a reply of the system it can not reach the desired performance. With the objective to surpass the limitations imposed for the classic controllers, a methodology of control in cascade is considered that consists of dividing the system in two subsistems the mechanical and hydraulic one. From the results of the simulations concludes that the cascade control presents one better when comparative performance to the classic controllers.

# CAPÍTULO 1.

## INTRODUÇÃO

RESUMO: Apresentam-se a importância dos robôs manipuladores hidráulicos na automação flexível, as dificuldades para controlar estes sistemas, um levantamento sobre o estado da arte no controle destes robôs e os objetivos deste trabalho. Por fim, discute-se como está organizado este texto.

### 1.1 A Importância dos Robôs Hidráulicos

Robôs manipuladores são estruturas cinemáticas compostas de elos mecânicos ligados entre si, formando uma cadeia aberta (quando cada elo se liga, no máximo, a outros dois, um em cada extremidade), ou fechada (quando é possível percorrer um caminho fechado sobre os braços do manipulador e voltar ao mesmo ponto de partida). Os elos são interligados uns aos outros através de juntas, nas quais existem atuadores que produzem os movimentos do manipulador, que terá tantos graus de liberdade quantas forem as juntas que o compõem.

A maior parte dos robôs é acionada eletricamente devido à facilidade de uso, simplicidade no controle e o custo de instalação. Entretanto, em várias aplicações industriais, tais como a manipulação de cargas pesadas, em atividades submarinas, em tarefas de manutenção e em plantas nucleares, torna-se mais atrativa a utilização de manipuladores hidráulicos. Isto ocorre devido às seguintes vantagens:

- Flexibilidade no projeto, devida à existência de atuadores lineares e rotacionais;
- Excelente relação torque/dimensão dos atuadores;
- Resposta rápida;
- Alta durabilidade;
- Facilidade de Vedação (ex: trabalho submarino).

## 1.2 O Problema de Controle dos Robôs Hidráulicos

Apesar das vantagens citadas acima, os robôs manipuladores hidráulicos possuem várias características dinâmicas não-lineares e incertezas paramétricas. Sendo assim, são sistemas relativamente difíceis de controlar. Por isto, os controladores para tais sistemas precisam garantir robustez frente a estas dificuldades.

A questão da robustez da malha fechada é fundamental em robôs manipuladores. Em situações que se deseja o seguimento de uma trajetória definida como, por exemplo, nos casos de aplicação de solda ou pintura de uma linha de montagem, o resultado final da tarefa é diretamente relacionado à precisão e robustez do controle.

Em seguida, são comentadas algumas dificuldades que devem ser contornadas por estes controladores.

### 1.2.1 Vazões das Válvulas

Como é abordada no capítulo 2, a dinâmica das válvulas que acionam os atuadores hidráulicos é expressa por funções não-lineares. Estas funções compreendem raízes quadradas, que se tornam mais complexas por exibirem descontinuidades. Estas descontinuidades são provocadas pela dependência do sentido de deslocamento das válvulas.

### 1.2.2 Compressibilidade

O sistema de atuação hidráulica destes robôs compreende um fluido confinado em cilindros com pistões. Estes fluidos são compressíveis e se comportam como uma mola, de maneira que as cargas (elos) rigidamente conectadas a estes atuadores se comportem como se estivessem montadas sobre essa mola (LINSINGEN, 2001).

Este comportamento oscilatório pode ser observado em estudos do modelo linear do atuador hidráulico (PAIM, 1997)(LOPES, 1997)(CUNHA, 1997). Nestes modelos, verificam-se um pólo simples na origem e um par de pólos complexos conjugados pouco amortecidos. Esta configuração de pólos dá ao sistema um comportamento de

primeira ordem, ao qual está superposta uma dinâmica oscilatória (PAIM, 1997). Desta forma, uma pequena perturbação ou variação nos parâmetros do sistema pode acarretar instabilidade.

### 1.2.3 Variações Paramétricas

Na linearização do modelo dos atuadores hidráulicos lineares (veja PAIM, 1997), observa-se que, por aproximação, termos não-lineares são considerados constantes. Entretanto, na realidade não é isto que acontece.

Mesmo na obtenção de modelos não-lineares do sistema de atuação hidráulica (CUNHA, 1997) (LOPES, 1997) hipóteses restritivas foram feitas como, por exemplo, considerar a massa específica do fluido constante, mesmo sabendo que esta varia com a pressão gerando assim outra fonte de incerteza.

Problemas de ordem prática também podem ser fontes de incertezas, um exemplo é a massa de óleo existente nas mangueiras que ligam as válvulas aos cilindros de elos consecutivos de um manipulador. Em alguns casos, esta massa pode significar uma considerável variação (LOPES, 1997).

### 1.2.4 Atrito

O atrito também é um importante fator a ser considerado nos manipuladores hidráulicos. Devido às altas pressões armazenadas, uma vedação compacta torna-se necessária para prevenir que os atuadores tenham vazamento entre as câmaras de alta pressão e as câmaras de baixa pressão. Isto gera atritos bastante altos. Como um exemplo, o atrito das juntas de um manipulador *Shiling Titan II* pode alcançar 30% do torque nominal dos atuadores (LISCHINSKY, 1999). Conseqüentemente, quando o robô precisa realizar trajetórias lentas, o manipulador pode exibir o comportamento conhecido como “stick-slip”, ou seja, apresentar oscilações provocadas por ciclos limite, prejudicando a precisão do movimento e diminuindo a vida útil das válvulas.



### 1.2.5 Zona-Morta

Esta não-linearidade ocorre devido ao tamanho do ressalto do carretel ser maior do que o pórtico, o que caracteriza uma válvula de centro supercrítico. Dessa forma, quando o carretel é movimentado, existe uma região em que não há vazão e, conseqüentemente, a não alteraao da posiao do atuador (CUNHA, 2001).

## 1.3 Algumas Propostas de Soluao

O controle e a dinâmica dos robôs manipuladores hidráulicos têm sido objeto de pesquisas há vários anos. Nesta seao apresentam-se algumas estratégias de controle implementadas para resolver o problema de controle destes robôs.

Em princípio, o controle clássico PID foi utilizado para manipuladores hidráulicos devido a sua simplicidade e facilidade de implementaao. Porém, diante de trajetórias que requerem alto desempenho, os efeitos das não-lineares se manifestam, deteriorando a resposta do sistema. Alguns trabalhos, tais como: ZHOU, 1995, M'SIRDI, 1997 e IAGNEMMA et al, 1997 destacam estas limitaoes.

Na seao seguinte, destacam-se algumas propostas para contornar as limitaoes apresentadas pelas técnicas clássicas de controle. Vale ressaltar que alguns trabalhos aplicam-se a mais de uma proposta de soluao.

### 1.3.1 Propostas Incluindo a Compensao do Atrito

Em LISCHINSKY et al. 1999, propõem-se controladores com compensao do atrito para um robô hidráulico industrial. Utiliza-se o modelo de **atrito** de *Lugre*, e em dois tipos de experimentos ocorre uma estimao off-line dos parâmetros. Estes experimentos são feitos para cada junta. Para o subsistema hidráulico é proposta uma lei de controle composta por uma realimentaao linearizante, um controle PI não-linear e uma parcela de desacoplamento que cancela a velocidade. Para o subsistema mecânico são propostos três controladores: sem compensao de atrito, com compensao fixa do atrito e com uma compensao adaptativa do atrito. Durante os experimentos, a

comparação entre estes controladores revela que o controlador com adaptação de parâmetros do atrito apresenta o menor erro de rastreamento. A prova de estabilidade é realizada apenas no subsistema mecânico sob a hipótese de um perfeito rastreamento no subsistema hidráulico.

SEPEHRI et al. (1996), faz um estudo de componentes experimental, matemático e de simulação para avaliar o grau que não-linearidades como **atritos**, folgas entre engrenagens e vazamentos que afetam o desempenho de uma escavadora hidráulica.

TAFAZOLI et al., (1998) desenvolvem um observador não-linear para o **atrito** de Coulomb que estima simultaneamente atrito, velocidade e, com o objetivo de diminuir o erro de trajetória, estima-se também a aceleração. Segundo os autores, isto melhora a robustez e reduz o atrito efetivo. São exibidos resultados experimentais verificando que esta proposta de controle possui desempenho melhor em relação a um controlador convencional PD. A prova teórica de estabilidade não é feita.

SIROUSPOUR e SALCUDEAN (2001) propõem um controlador não-linear adaptativo utilizando a técnica do *backstepping*. São usados dois tipos de observadores para evitar a realimentação de aceleração nas leis de controle adaptativo. O primeiro observador é uma extensão do observador baseado na passividade proposto por BERHUIS e NIJMEIJER (1993) e o conceito de observador por modos deslizantes proposto por C.C. de WIT e J. J. SLOTINE (1991) é usado para um segundo observador robusto de aceleração. É realizada a prova de estabilidade usando a análise de Lyapunov, além de mostrar que os erros das trajetórias convergem para zero, na presença do **atrito** de Coulomb dos atuadores. Resultados de simulação e experimentais são apresentados usando a plataforma *Stewart UBC* de atuadores lineares.

HONEGGER e CORKE (2001) apresentam a implementação de um controle em cascata dividido em: um controle de movimento baseado no modelo, para compensar o **atrito** e a gravidade, e outro controle para o controle da força desenvolvida pelos atuadores. O primeiro é dividido em três partes independentes: um controlador PD linear para todos os atuadores, um controle *feedforward* que calcula o torque dos atuadores para um dado movimento, usando um modelo de dinâmica inversa, e um

algoritmo que adapta os parâmetros dinâmicos no controle *feedforward*, para minimizar os erros de trajetória. O segundo utiliza um controle PID com um filtro passa baixa, para controlar o sinal de abertura das válvulas. Resultados experimentais são apresentados, mas não é realizada a prova teórica de estabilidade.

### 1.3.2 Propostas Incluindo a Compensação da Zona-Morta

Em sua tese de doutorado, CUNHA (2001) comenta que nas implementações experimentais realizadas com válvulas proporcionais, normalmente existe uma **zona-morta** significativa. Além disso, ressalta que no caso de um controlador proporcional esta zona-morta influencia principalmente o erro de posicionamento. Como forma de contornar este erro utiliza-se a inversa da zona morta em sua lei de controle em cascata para atuadores hidráulicos lineares. É apresentada a prova teórica de estabilidade com este controlador.

SEPEHRI et al. (1997), desenvolve um controlador PI não-linear, construído sobre um controlador PI convencional. A montagem deste controlador divide-se em três partes: A primeira multiplica o erro integral acumulado por um fator de variação do erro de velocidade. Esta modificação pretende impedir o efeito *windup* integral e permite o uso de grandes ganhos integrais. A segunda modificação trata o problema da **zona-morta** no fluxo hidráulico e de *sticção* nas juntas. Para tanto, é introduzido um filtro não-linear. Este filtro permite ao manipulador seguir as mudanças no *set-point* sem atraso. A terceira modificação permite a redução do *overshoot* na resposta à desaceleração. Isto é realizado impulsionando o erro da posição por um fator proporcional a um termo da desaceleração. Os experimentos realizando cada uma dessas modificações são apresentados em SEPEHRI et al. (1997). A análise teórica de estabilidade não é desenvolvida.

### 1.3.3 Propostas para Contornar as Incertezas Paramétricas

Recentemente, a necessidade e desejo de exploração submarina para extração de recursos minerais e preservação do ambiente global, tem sido uma forte motivação para a pesquisa de robôs submarinos. A.C. CLEGG, (2001) desenvolve um controle híbrido

auto-ajustável de força e posição para robôs hidráulicos, aplicados em atividades subaquáticas. Discute-se a respeito sobre as influências que este ambiente exerce sobre a modelagem do robô e são apresentados resultados experimentais aplicados num robô de atuadores hidráulicos rotativos. Não é realizada a prova teórica de estabilidade.

Em N. K. M' SIRDI et al. (1997), apresenta-se um controlador robusto através da aproximação por estrutura variável aplicado a um manipulador hidráulico subaquático, a estabilidade global é provada através do método direto de Lyapunov e utilizando a técnica do *backstepping*. São apresentados resultados de simulações.

S. R. HABIBI (1999) também usa estrutura variável num robô industrial, composto de atuadores hidráulicos lineares e rotacionais. Este controlador é resultado da soma entre o controle à estrutura variável e o controle por torque computado. Esta técnica tem o objetivo de contornar as imprecisões do modelo. Não é apresentada a prova teórica de estabilidade.

F. BU e B. YAO (2001), propõem um controle adaptativo robusto. Para evitar a necessidade de uma realimentação de aceleração para uma estrutura *backstepping*, utiliza-se a propriedade da matriz adjunta e o determinante da matriz de inércia serem linearmente parametrizados através da seleção de parâmetros convenientes e o método de sobreparametrização é utilizado. Simulações e resultados experimentais são expostos. É realizada a prova de estabilidade utilizando o método direto de Lyapunov.

Em CUNHA et al. (1997), apresenta-se o controlador em cascata baseado no modelo linear do atuador. A robustez deste controlador é analisada quando existem incertezas paramétricas. Resultados de simulações são apresentados e ilustram as principais características deste controlador.

GUENTHER et al.(1998) propõem um controlador em cascata para atuadores hidráulicos, combinando estruturas de controle adaptativa e de estrutura variável, duas técnicas frequentemente utilizadas para compensação de incertezas. O controle adaptativo é baseado nos conceitos de passividade e o controle à estrutura variável é baseado no trabalho de Bailey e Arapostatis (1987). Este controlador é denominado de VS-ACC (*Variable Structure Adaptive Cascade Control*). A estabilidade teórica é

provada através do método direto de Lyapunov e são apresentados resultados de simulação.

Em N. SEPEHRI et al, (1990) é proposto um controle em cascata para um robô hidráulico com atuadores rotacionais com dois graus de liberdade e controle independente de juntas, denominado de controle em cascata auto-ajustável. No subsistema mecânico utiliza-se um controlador adaptativo auto-ajustável, e para o subsistema hidráulico é usado um controlador proporcional ao erro entre a diferença de pressão e a diferença de pressão desejada e uma parcela para o cancelamento do termo que é função da velocidade. Realiza-se nas simulações, uma análise comparativa entre este controle em cascata e um controlador PD. Os resultados do controle em cascata auto-ajustável são melhores. Entretanto, os autores não apresentam a prova de estabilidade teórica do controlador proposto.

## 1.4 Objetivos deste Trabalho

Para justificar sua concepção, são relatados a seguir os objetivos deste trabalho:

- Modelar um robô hidráulico de atuadores lineares de forma sistemática;
- Aplicar uma estratégia de controle em cascata a este robô;
- Desenvolver a prova teórica de estabilidade deste controlador em cascata quando os parâmetros deste robô são conhecidos;
- Desenvolver um simulador com IHM (Interface Homem Máquina) amigável para este robô hidráulico, baseado no bem conhecido ambiente *MATLAB - Simulink* e adicionalmente, gerar um documento que explique de forma clara e objetiva toda a estrutura deste simulador.
- A partir deste simulador, realizar uma comparação preliminar entre o controlador em cascata e um controlador convencional.

## 1.5 Organização deste Texto

O capítulo 2 apresenta as modelagens cinemática e dinâmica de um manipulador robótico acionado por atuadores hidráulicos lineares assimétricos. Destaca-se a matriz de transmissão que converte o movimento linear dos atuadores para o movimento rotacional dos elos desses robôs. Por fim, interpreta-se a interconexão dos subsistemas hidráulico e mecânico que compõem este robô.

No capítulo 3, faz-se uma abordagem sobre controladores clássicos, especificamente PD e PID. É apresentado o algoritmo de controle em uma metodologia em cascata. Baseado no método da estabilidade de Lyapunov demonstra-se que o erro de malha fechada é exponencialmente estável.

O capítulo 4 especifica um modelo para simulação do robô hidráulico. É mostrado como são realizadas as trajetórias desejadas para o robô. Realizam-se simulações e compara-se o desempenho da estratégia em cascata com o desempenho obtido usando uma estratégia clássica de controle. Finalmente, analisa-se o desempenho do controlador em cascata diante de incertezas paramétricas.

No capítulo 5, apresentam-se as conclusões e perspectivas.

## CAPÍTULO 2.

# MODELAGEM DE UM ROBÔ COM ACIONAMENTO HIDRÁULICO

RESUMO: Apresentam-se as equações do movimento para um modelo de robô manipulador em que a dinâmica hidráulica dos atuadores é considerada. Este modelo é interpretado como dois subsistemas interconectados.

### 2.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a modelagem matemática de um manipulador robótico. Tal manipulador é constituído de juntas rotativas e seus elos são acionados por atuadores hidráulicos lineares assimétricos. Nesta modelagem destaca-se a matriz de transmissão que converte o movimento linear dos atuadores para o movimento rotacional dos elos desses robôs. Esta matriz é obtida através de uma metodologia geométrica que tem o objetivo de facilitar a implementação do algoritmo de simulação.

Apresenta-se também uma interpretação da forma de interconexão dos subsistemas hidráulico e mecânico que compõem este robô. Esta serve de fundamento para a futura compreensão da estratégia de controle em cascata.

### 2.2 Modelagem Cinemática

A matriz de transmissão é fundamental na dedução das equações cinemáticas e dinâmicas do robô utilizadas para simulação e controle.

Em diversos trabalhos ( HABIBI et al, 1994)(MEDANIC et al, 1997)(BEINER, 1997)(M'SIRDI et al, 1997) onde este mecanismo está presente, pode-se observar que as matrizes de transformação e Jacobianos são obtidos através de relações geométricas,

construídas para uma certa localização de atuador em relação ao elo e válidas apenas para esta configuração particular. Isto resulta num trabalho repetitivo de dedução das equações, mediante qualquer alteração na localização do atuador, e dificultando a implementação de um algoritmo computacional simples.

A metodologia apresentada neste trabalho tem por objetivo deduzir uma formulação generalizada e de simples implementação computacional, a partir da convenção de uma seqüência de etapas e parâmetros geométricos (VALDIERO E SANTOS, 2001).

### 2.2.1 Metodologia Geométrica Proposta

Considere o desenho esquemático de um robô mostrado na figura 2.1, cujo mecanismo é composto de elos ligados por juntas rotativas e acionado por atuadores lineares.

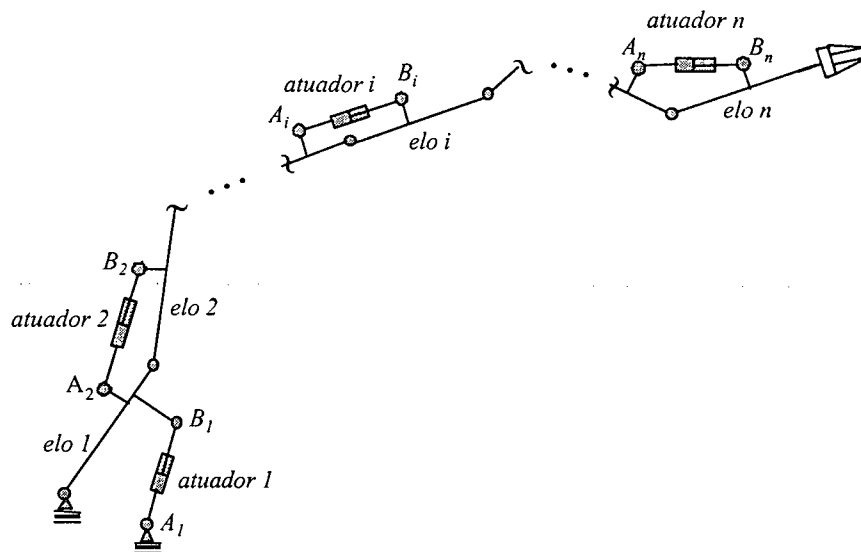


Figura 2.1: Robô de juntas rotativas com seus elos acionados por atuadores lineares.

Tem-se por premissas que:



p.1) O manipulador é totalmente acionado por atuadores lineares, ou seja, cada elo  $i$  é acionado por um atuador  $i$ .

p.2) Cada atuador linear  $i$  pode ser perfeitamente localizado através dos pontos  $A_i$  e  $B_i$ ; onde o ponto  $A_i$  é solidário e fixo ao elo “ $i-1$ ” e pode ser descrito pelas coordenadas  $(x_{Ai}, y_{Ai})$  no sistema de referência do elo “ $i-1$ ”; e analogamente o ponto  $B_i$  é fixo ao elo  $i$  e pode ser descrito pelas coordenadas  $(x_{Bi}, y_{Bi})$  no sistema de referência do elo “ $i$ ”.

A partir destas premissas, a relação entre o deslocamento do cilindro e a rotação na respectiva junta é definida seguindo os seguintes passos:

1º passo) O sistema de referência utilizado nos elos está de acordo com a convenção de Denavit-Hartenberg (SCIAVICCO E SICILIANO, 1996).

2º passo) Uma vez definidos os sistemas de referência dos elos “ $i-1$ ” e “ $i$ ”, conforme o 1º passo, os pontos  $A_i$  e  $B_i$  do atuador  $i$  são localizados nos primeiros quadrantes dos respectivos sistemas de referência, conforme a figura 2.2, apenas para efeito da dedução das relações geométricas

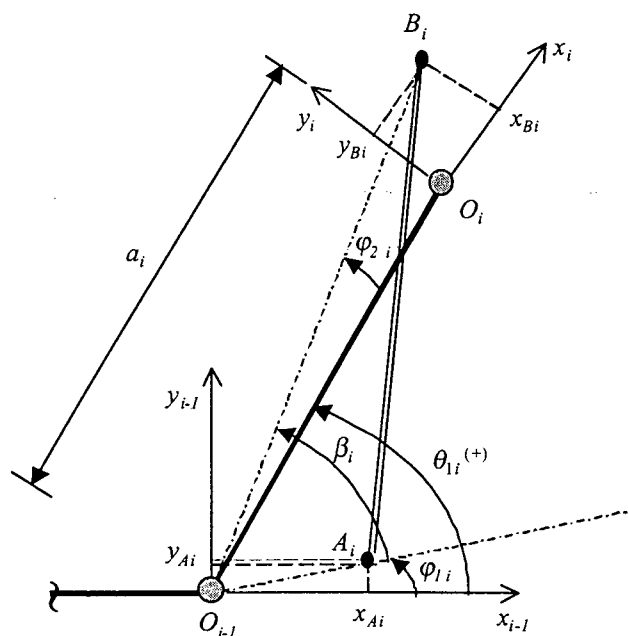


Figura 2.2: Localização do atuador  $i$  para efeito das deduções geométricas.

3º passo) Seguindo o 2º passo, é possível deduzir expressões gerais para quaisquer quadrantes.

Observa-se na figura 2.2 que os ângulos  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  são características geométricas constantes para um dado projeto de robô. O ângulo  $\varphi_{1i}$  é medido entre o eixo  $x_{i-1}$  e o seguimento  $\overline{O_{i-1}A_i}$  e  $\varphi_{2i}$  é o ângulo entre o eixo  $x_i$  e o seguimento  $\overline{O_{i-1}B_i}$ , dados pelas expressões:

$$\varphi_{1i} = \arctg 2 \left( \frac{y_{A_i}}{x_{A_i}} \right) \quad (2.1)$$

$$\varphi_{2i} = \arctg 2 \left( \frac{y_{B_i}}{a_i + x_{B_i}} \right), \quad (2.2)$$

onde  $(x_{A_i}, y_{A_i})$  e  $(x_{B_i}, y_{B_i})$  são as coordenadas que definem o atuador  $i$  conforme a premissa p.2, e são facilmente determinados para qualquer localização do robô;  $a_i$  é a distância da normal comum entre os eixos das juntas.

Observando-se ainda a figura 2.2, pode-se escrever:

$$\beta_i = \theta_i + \varphi_{2i} - \varphi_{1i} = \theta_i - (\varphi_{1i} - \varphi_{2i}) = \theta_i - \Delta\varphi_i, \quad (2.3)$$

onde  $\beta_i$  é o ângulo formado pelos segmentos  $\overline{O_{i-1}A_i}$  e  $\overline{O_{i-1}B_i}$ ,  $\theta_i$  é a variável de junta (convenção Denavit-Hartenberg), e  $\Delta\varphi_i$  é um parâmetro construtivo calculado através da subtração das equações (2.1) e (2.2).

4º passo) Os pontos  $O_{i-1}$ ,  $A_i$  e  $B_i$  da figura 2.2 formam um triângulo representado na figura 2.3, onde pode-se deduzir uma relação geométrica generalizada entre o deslocamento linear  $y_i$  do atuador  $i$  e o respectivo deslocamento angular  $\theta_i$  do elo  $i$ ,

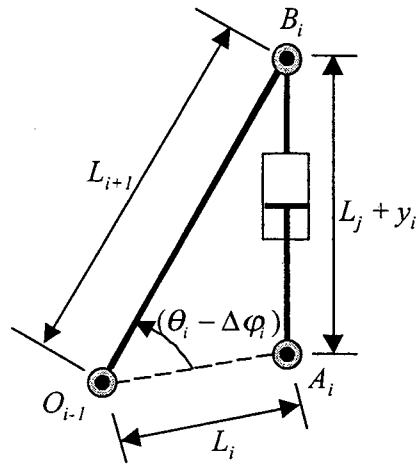


Figura 2.3: Triângulo para a dedução da relação geométrica entre  $y_i$  e  $\theta$ .

Pela aplicação da lei dos cossenos na figura 2.3, tem-se que:

$$y_i = \sqrt{L_{i+1}^2 + L_i^2 - 2|L_{i+1}||L_i|\cos(\theta_i - \Delta\varphi_i)} - L_j, \quad (2.4)$$

onde os parâmetros construtivos são dados por

$$L_i = \overline{O_{i-1}A_i} = \sqrt{x_{A_i}^2 + y_{A_i}^2}, \quad (2.5)$$

$$L_{i+1} = \overline{O_{i-1}B_i} = \sqrt{(a_i + x_{B_i})^2 + y_{B_i}^2}, \quad (2.6)$$

$$\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_{2i}, \quad (2.7)$$

e  $L_j$  é o comprimento do atuador, ou seja,  $\overline{A_iB_i}$ , para uma dada posição do atuador linear onde o deslocamento  $y_i$  é considerado nulo. Convencionou-se que  $y_i = 0$  para a metade do curso do atuador.

A equação (2.4) fornece a relação  $y_i = f(\theta)$  que pode ser facilmente obtida através da localização dos pontos  $A_i$  e  $B_i$  do atuador  $i$ .

## 2.2.2 Cinemática Diferencial

Com a relação (2.4), obtém-se a relação entre a variação do comprimento do atuador e a respectiva variação do deslocamento da junta, dada pela equação (2.8).

$$\frac{\partial y_i}{\partial \theta_i} = \bar{J}_i = \frac{L_i L_{i+1} \sin(\theta_i - \Delta \varphi_i)}{\sqrt{L_i^2 + L_{i+1}^2 - 2L_i L_{i+1} \cos(\theta_i - \Delta \varphi_i)}}, \quad (2.8)$$

em que,  $L_i$ ,  $L_{i+1}$  e  $\Delta \varphi_i$  são características construtivas do posicionamento do atuador  $i$  em relação ao elo  $i$ ,  $y_i$  é o deslocamento do pistão do atuador,  $L_j$  é o comprimento do atuador quando  $y_i$  é nulo e  $\theta_i$  é a variável da junta  $i$  de acordo com a convenção de Denavit-Hartenberg.

A matriz de transmissão que relaciona as velocidades de cada junta com as velocidades dos atuadores lineares é dada por,

$$\bar{J} = \begin{bmatrix} \bar{J}_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \bar{J}_n \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Assim, os vetores de velocidade e aceleração dos atuadores,  $\dot{y}$  e  $\ddot{y}$ , podem ser escritos em função dos vetores de velocidade e aceleração das juntas,  $\dot{q}$  e  $\ddot{q}$ , utilizando as relações cinemáticas que transformam os movimentos lineares dos atuadores em movimentos rotacionais das juntas, observadas nas equações (2.10) e (2.11):

$$\dot{y} = \bar{J} \dot{q}, \quad (2.10)$$

$$\ddot{y} = \bar{J} \ddot{q} + \dot{\bar{J}} \dot{q}. \quad (2.11)$$

## 2.3 Modelagem do Subsistema Mecânico

O braço robótico é freqüentemente considerado como uma cadeia simples de  $n$  elos rígidos ligados por juntas de rotação, às quais aplicam-se torques  $\tau_i, i = 1, \dots, n$ . O desenvolvimento das equações que regem o movimento desta cadeia de elos é descrito detalhadamente em diversos trabalhos (CRAIG, 1986; SLOTINE E LI, 1988; LEWIS, ABDALLAH E DOWSON, 1993; SCIAVICCO E SICILIANO, 1996), e resulta em,

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (2.12)$$

onde:

$q$  vetor de coordenadas das juntas;

$\dot{q}$  é o vetor das velocidades das juntas;

$\ddot{q}$  é o vetor das acelerações das juntas;

$H(q)$  é a matriz de inércia;

$C(q, \dot{q})$  é a matriz das forças de Coriolis e forças centrífugas;

$G(q)$  é o vetor das forças gravitacionais;

$\tau$  é o vetor de torques das juntas.

Sendo o manipulador acionado por atuadores hidráulicos lineares, como é ilustrado na figura 2.1 e seu modelo dinâmico é dado pela equação (2.12), o torque de acionamento das juntas é obtido a partir do Princípio do Trabalho Virtual (SCIAVICCO E SICILIANO, 1996) e dado por

$$\tau = \bar{J}^T F_L \quad (2.13)$$

onde  $F_L$  é o vetor com as forças aplicadas pelos atuadores, em cada elo do robô, compostas pelo vetor das forças hidráulicas (devido a diferença de pressão entre as câmaras dos atuadores), pelo vetor das forças de inércia dos atuadores, pelo vetor das forças de amortecimentos viscosos e pelo vetor das componentes das forças gravitacionais dos atuadores. A equação (2.13) pode ser reescrita associando os torques nas juntas às características dinâmicas de cada atuador:

$$\tau = \bar{J}^T [A_1 p_1 - A_2 p_2] - \bar{J}^T M \ddot{y} - \bar{J}^T B_v \dot{y} - \bar{J}^T P_{AT}(q) \quad (2.14)$$

onde:

$\tau$  é o vetor de torque nas juntas;

$A_1$  e  $A_2$  são as matrizes diagonais das seções transversais dos atuadores;

$p_1$  e  $p_2$  são os vetores das pressões nas respectivas câmaras 1 e 2 dos atuadores;

$B_v$  é a matriz diagonal dos coeficientes de atrito viscoso dos atuadores e das cargas dos elos;

$M$  é a matriz diagonal das massas dos atuadores.

$P_{AT}(q)$  é o vetor das componentes das forças gravitacionais dos atuadores (veja o apêndice B).

Uma análise específica das características dinâmicas do atuador é apresentada na seção 2.3.

Substituindo as equações (2.10) e (2.11) na equação (2.14), tem-se

$$\tau = \bar{J}^T [A_1 p_1 - A_2 p_2] - [\bar{J}^T M \bar{J}] \ddot{q} - [\bar{J}^T M \dot{\bar{J}} + \bar{J}^T B_v \bar{J}] \dot{q} - \bar{J}^T P_{AT}(q). \quad (2.15)$$

Aplicando a equação (2.15) na equação (2.12) e após alguma manipulação algébrica, obtém-se a equação que representa o subsistema mecânico do manipulador:

$$H^*(q)\ddot{q} + C^*(q, \dot{q})\dot{q} + D^*(q)\dot{q} + G^*(q) = \bar{J}^T F_h \quad (2.16)$$

onde:

$H^*(q) = [H(q) + \bar{J}^T M \bar{J}]$  é a matriz de inércia modificada, considerando a inércia dos atuadores;

$C^*(q, \dot{q}) = [C(q, \dot{q}) + \bar{J}^T M \dot{\bar{J}}]$  é a matriz de Coriolis modificada, considerando a inércia dos atuadores;

$D^*(q) = \bar{J}^T B_v \bar{J}$  é a matriz do atrito viscoso dos atuadores e da carga dos elos;

$G^*(q) = [G(q) + \bar{J}^T P_{AT}(q)]$  é o vetor das forças gravitacionais modificado, considerando as componentes dos pesos dos atuadores;

$F_h = [A_1 p_1 - A_2 p_2]$  é o vetor da força hidráulica produzida pela diferença de pressão nos atuadores.

## 2.4 Modelagem do Subsistema Hidráulico

A modelagem deste subsistema é baseada no estudo do *i-ésimo* atuador hidráulico exibido na figura 2.4, (DE NEGRI, 1988; GUENTHER e DE PIERI, 1997; BU E YAO, 2000; CUNHA, 2001; VALDIERO, 2001;). Este atuador consiste de um cilindro diferencial, controlado por uma válvula direcional proporcional tipo carretel de 4 vias e de centro crítico. A diferença de pressão hidráulica entre as câmaras de cada atuador possibilita a transmissão de energia mecânica que movimenta cada elo do robô.

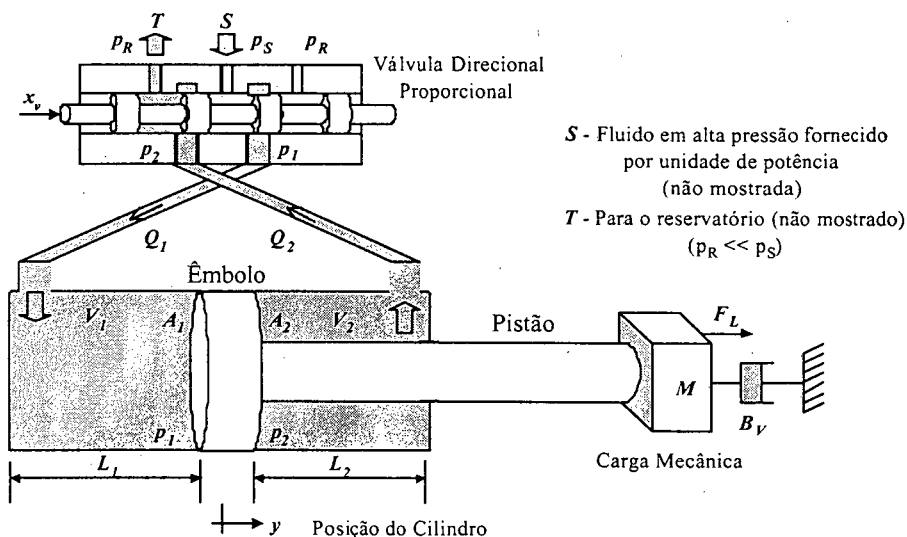


Figura 2.4. Atuador Hidráulico.

As vazões  $Q_1$  e  $Q_2$  que entram e saem pelas portas de controle, são obtidas pela equação da vazão através de orifícios (MERRIT, 1967; LINSINGEN, 2001),

$$Q_1 = k_1 g_1(p_1, \text{sign}(x_v)) x_v, \quad (2.17)$$

$$Q_2 = k_2 g_2(p_2, \text{sign}(x_v)) x_v, \quad (2.18)$$

onde,  $k_{1,2}$  são as constantes hidráulicas do sistema,  $x_v$  é o deslocamento do carretel da válvula e as funções  $g_1(p_1, \text{sign}(x_v))$  e  $g_2(p_2, \text{sign}(x_v))$  (BU, F.; YAO, B., 2000), são dadas por,

$$g_1(p_1, \text{sign}(x_v)) = \begin{cases} \sqrt{|p_S - p_1|}, & x_v \geq 0 \\ \sqrt{|p_1 - p_R|}, & x_v < 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

$$g_2(p_2, \text{sign}(x_v)) = \begin{cases} \sqrt{|p_2 - p_R|}, & x_v \geq 0 \\ \sqrt{|p_S - p_2|}, & x_v < 0 \end{cases} \quad (2.20)$$

sendo  $p_S$  e  $p_R$  as pressões de suprimento e de retorno, respectivamente.



Aplicando a equação da continuidade para as câmaras 1 e 2 do cilindro, tem-se:

$$Q_1 - C_{in} p_{\Delta} = \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_1}{\beta} \cdot \frac{dp_1}{dt}, \quad (2.21)$$

$$C_{in} p_{\Delta} - Q_2 = \frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2}{\beta} \cdot \frac{dp_2}{dt}. \quad (2.22)$$

onde:

$p_{\Delta} = p_1 - p_2$  é a diferença de pressão entre as câmaras;

$\beta$  é o módulo de elasticidade do fluido ( $\text{N/m}^2$ );

$V_1$  é o volume de fluido na câmara 1 [ $\text{m}^3$ ];

$V_2$  é o volume de fluido na câmara 2 [ $\text{m}^3$ ];

$C_{in}$  é o coeficiente de vazamento.

Os volumes totais entre as câmaras do atuador e a válvula são

$$V_1(y) = A_1(L_1 + y) + V_{tub}; \quad (2.23)$$

$$V_2(y) = A_2(L_2 - y) + V_{tub} \quad (2.24)$$

onde:

$L_1$  e  $L_2$  são os comprimentos das câmaras 1 e 2;

$V_{tub}$  é o volume de fluido na tubulação que conecta cada câmara à válvula;

Das equações (2.23) e (2.24) verifica-se que

$$\frac{dV_1(y)}{dt} = A_1 \frac{dy}{dt}, \quad (2.25)$$

$$\frac{dV_2(y)}{dt} = -A_2 \frac{dy}{dt}. \quad (2.26)$$

Substituindo as equações (2.17), (2.23) e (2.25) na equação (2.21) e as equações (2.18), (2.24) e (2.26) na equação (2.22) e efetuando manipulações algébricas, obtém-se

$$\frac{dp_1}{dt} = \dot{p}_1 = \frac{\beta}{V_{h1} + A_1 y} [k g_1(p_1, \text{sign}(x_v)) x_v - A_1 \dot{y} - C_{in} p_\Delta], \quad (2.27)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \dot{p}_2 = \frac{\beta}{V_{h2} - A_2 y} [A_2 \dot{y} - k g_2(p_2, \text{sign}(x_v)) x_v + C_{in} p_\Delta], \quad (2.28)$$

onde  $V_{h(i)}$  representa os volumes das câmaras do atuador, com o cilindro na origem do deslocamento, incluindo o volume das tubulações e são dados por:

$$V_{h1} = A_1 L_1 + V_{tub}, \quad (2.29)$$

$$V_{h2} = A_2 L_2 + V_{tub}. \quad (2.30)$$

As equações (2.27) e (2.28) apresentam uma natureza não-linear devido à equação da vazão na válvula e a dependência do volume nas câmaras do atuador com o deslocamento do cilindro. As não-linearidades aparecem nos termos de  $g_1(p_1, \text{sign}(x_v))$  e  $g_2(p_2, \text{sign}(x_v))$ , devido aos termos de raiz quadrada e nos termos  $1/(V_{h1} + A_1 y)$  e  $1/(V_{h2} - A_2 y)$ .

Rescrevendo as equações (2.27) e (2.28), utilizando a equação (2.10) e após algumas simplificações, têm-se:

$$\dot{p}_1 = E_1(q, p_1, \text{sign}(x_v)) x_v - F_1(q) \bar{J} \dot{q} - D_1(q) C_{in} p_\Delta, \quad (2.31)$$

$$\dot{p}_2 = F_2(q)\bar{J}\dot{q} - E_2(q, p_2, \text{sign}(x_v))x_v + D_2(q)C_{in} p_\Delta, \quad (2.32)$$

As equações (2.31) e (2.32) são generalizações para um modelo com “ $n$ ” atuadores, onde:

$$E_1(q, p_1, \text{sign}(x_v)) = \text{diag} \left[ \frac{\beta}{V_{h1i} + A_{1i} y_i} k g_1(p_{1i}, \text{sign}(x_{vi})) \right], \quad (2.33)$$

$$E_2(q, p_2, \text{sign}(x_v)) = \text{diag} \left[ \frac{\beta}{V_{h2i} - A_{2i} y_i} k g_2(p_{2i}, \text{sign}(x_{vi})) \right], \quad (2.34)$$

$$F_1(q) = \text{diag} \left[ \frac{\beta}{V_{h1i} + A_{1i} y_i} A_{1i} \right], \quad (2.35)$$

$$F_2(q) = \text{diag} \left[ \frac{\beta}{V_{h2i} - A_{2i} y_i} A_{2i} \right], \quad (2.36)$$

$$D_1(q) = \text{diag} \left[ \frac{\beta}{V_{h1i} + A_{1i} y_i} \right], \quad (2.37)$$

$$D_2(q) = \text{diag} \left[ \frac{\beta}{V_{h2i} - A_{2i} y_i} \right]. \quad (2.38)$$

As equações de (2.33) a (2.38) são funções não-lineares que, através da equação (2.4), expressam sua dependência em relação ao movimento rotacional das juntas.

Considere a força hidráulica aplicada em cada elo, devido à diferença de pressão entre as câmaras 1 e 2,

$$F_h = [A_1 p_1 - A_2 p_2]. \quad (2.39)$$

Derivando a equação (2.39) em relação ao tempo,

$$\dot{F}_h = [A_1 \dot{p}_1 - A_2 \dot{p}_2]. \quad (2.40)$$

Substituindo as equações (2.31) e (2.32) na equação (2.40), obtém-se

$$\begin{aligned} \dot{F}_h = & -(A_1 F_1(q) + A_2 F_2(q)) \dot{q} - (A_1 D_1(q) + A_2 D_2(q)) C_{in} P_{\Delta} + \\ & + [A_1 E_1(q, p_1, \text{sign}(x_v)) + A_2 E_2(q, p_2, \text{sign}(x_v))] x_v \end{aligned} \quad (2.41)$$

A equação (2.41) representa o subsistema hidráulico do manipulador.

## 2.5 Considerações sobre o Modelo

### 2.5.1 Dinâmica das Válvulas

No processo de modelagem do robô hidráulico, desprezou-se a dinâmica das válvulas que acionam os atuadores. Entretanto, estas válvulas podem ser representadas por sistemas dinâmicos de 2ª ordem (VALDIERO, 2001). Esta negligência pode afetar significativamente o comportamento dinâmico das válvulas, provocando a excitação destes modos desprezados. Isto se torna bastante relevante ao se aplicarem leis de controle como a de estrutura variável (LOPES, 1997).

### 2.5.2 Dinâmicas das Tubulações

Além da dinâmica das válvulas, também são desprezadas, neste trabalho, as dinâmicas das linhas das tubulações que conectam os atuadores do robô à suas respectivas válvulas. Quando estas tubulações são longas, pode-se originar um comportamento dinâmico considerável. Tais dinâmicas devem ser inseridas em série com as dinâmicas dos atuadores e das válvulas (HEINTZE, 1997). No presente trabalho, considera-se que as válvulas são montadas sobre o corpo dos cilindros, resultando em tubulações extremamente curtas.

### 2.5.3 Módulo de Elasticidade Volumétrica

No processo de modelagem do robô, por simplificação, considerou-se que o módulo de elasticidade volumétrica seria constante, mesmo sabendo-se que o valor mesmo depende da pressão e da temperatura do fluido. Em CUNHA 2001, esta variação pode ser vista com mais detalhes.

Portanto, esta incerteza causa um erro no cálculo das funções não-lineares do subsistema hidráulico  $E_1(q, p_1, \text{sign}(x_v))$ ,  $E_2(q, p_2, \text{sign}(x_v))$ ,  $F_1(q)$ ,  $F_2(q)$ ,  $D_1(q)$  e  $D_2(q)$ , o que dificulta a linearização por meio de uma realimentação quando um controlador não-linear é usado para cancelar estas funções.

### 2.5.4 Atrito

Na modelagem do subsistema hidráulico apenas o atrito viscoso foi considerado explicitamente. Todavia, o atrito estático e o atrito de Coulomb normalmente representam uma importante parcela em um sistema de posicionamento hidráulico. Modelos dinâmicos para o atrito podem ser encontrados em TAFAZOLI et al., (1998) e LISCHINSKY et al., (1999).

Para trabalhos futuros, pretende-se acrescentar um modelo mais completo do atrito para realizar sua compensação.

## 2.6 O Robô Hidráulico como um Sistema Interconectado

Esta interpretação de subsistemas interconectados está baseada nos estudos de GUENTHER e HSU, (1993) para robôs com acionamentos elétricos e CUNHA, (2001) para atuadores hidráulicos.

Considerando a dinâmica do robô hidráulico, representada pelas equações 2.16 e 2.41, reescrita abaixo.

$$H^*(q)\ddot{q} + C^*(q, \dot{q})\dot{q} + D^*(q)\dot{q} + G^*(q) = \bar{J}^T F_h, \quad (2.42)$$

$$\begin{aligned} \dot{F}_h = & -(A_1 F_1(q) + A_2 F_2(q))\dot{q} - (A_1 D_1(q) + A_2 D_2(q))C_{in} p_\Delta + \\ & + [A_1 E_1(q, p_1, \text{sign}(x_v)) + A_2 E_2(q, p_2, \text{sign}(x_v))]x_v \end{aligned} \quad (2.43)$$

O robô hidráulico pode ser interpretado como um subsistema mecânico (2.42) acionado por uma força hidráulica  $F_h$ , a qual é gerada no subsistema hidráulico (2.43). Esta força hidráulica surge devido a uma diferença de pressão, quando ocorre o deslocamento da válvula  $x_v$ .

Observando-se ainda a equação (2.43), nota-se a dependência do subsistema hidráulico em relação às variáveis  $q$  e  $\dot{q}$  do subsistema mecânico. Diante dessa análise, verifica-se que a representação do sistema transforma o mesmo em dois subsistemas interconectados (veja figura 2.5).

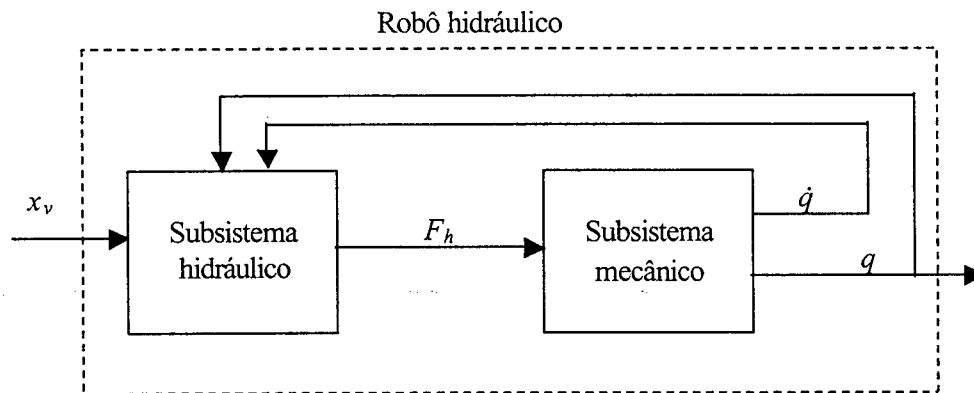


Figura 2.5. Interpretação de subsistemas interconectados para o robô hidráulico.

## 2.7 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas: a modelagem cinemática e as modelagens do subsistema mecânico e do subsistema hidráulico dos robôs manipuladores acionados por atuadores hidráulicos lineares.

Na modelagem cinemática, descreveu-se uma metodologia geométrica que simplifica e generaliza a obtenção da relação de transmissão do movimento linear em movimento rotacional dos elos dos robôs manipuladores.

Na modelagem do subsistema mecânico utilizou-se a formulação de Lagrange, e com base no princípio do trabalho virtual, esta formulação é agregada ao modelo mecânico dos atuadores, enquanto que a modelagem do subsistema hidráulico é desenvolvida a partir das equações da vazão através de orifícios e da continuidade, as quais determinam a dinâmica dos atuadores lineares assimétricos daquele subsistema.

Foram expostos alguns problemas do controle do robô hidráulico discutindo as considerações de sua modelagem. Pode-se notar a necessidade de aperfeiçoamento do modelo objetivando maior aproximação da realidade.

Uma breve abordagem estabeleceu a interconexão entre os subsistemas mecânico e hidráulico.

No próximo capítulo, apresenta-se um controlador em uma estratégia em cascata onde a sua análise de estabilidade é feita para os subsistemas interconectados.

## CAPÍTULO 3.

### CONTROLE EM CASCATA

RESUMO: Apresenta-se o projeto do controlador em cascata para o robô hidráulico, quando os parâmetros são conhecidos, e, adicionalmente, sua prova de estabilidade.

#### 3.1 Introdução

Neste capítulo, faz-se primeiramente uma breve recapitulação sobre controladores clássicos, especificamente PD e PID, onde são comentadas suas estruturas e implicações no controle de robôs hidráulicos. A seguir, é apresentado um algoritmo de controle para o robô hidráulico descrito e modelado no capítulo 2. O algoritmo é fundamentado em uma metodologia de redução de ordem, a partir da qual define-se uma estratégia de controle em cascata.

Utilizando o projeto de controle em cascata, e baseado no método da estabilidade de Lyapunov, demonstra-se que o erro de malha fechada é globalmente exponencialmente estável quando os parâmetros do sistema são conhecidos.

#### 3.2 Controle clássico

##### Controle PD/PID

Dois dos controladores “mais simples”, que foram empregados inicialmente para o controle no espaço das juntas, foram os controladores clássicos PD e PID. Através de leis de controle relativamente simples é possível atender os requisitos de controle:

$$u_{PD} = K_p(q_d - q) + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) \quad (3.1)$$



correspondendo ao controlador do tipo PD, e

$$u_{PID} = K_p(q_d - q) + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_i \int_0^t (q_d - q) dt, \quad (3.2)$$

caracterizando uma estrutura de controle do tipo PID. Os termos  $K_{(i)}$  correspondem as matrizes de ganho dos controladores, da ordem  $\in \mathcal{R}^{n \times n}$ , estas matrizes são positivas e geralmente diagonais, sendo  $n$  o número de graus de liberdade e  $q_d$  é o valor de referência para o deslocamento nas juntas  $q$ .

O controlador PD não consegue resolver o problema de seguimento de trajetória, apresentando valores de erros em regime permanente. Uma alternativa muito empregada, que melhora o desempenho do controlador PD, consiste em incluir um termo de compensação (geralmente da gravidade, e mais raramente, de atrito). Entretanto para obter um desempenho razoável, é necessário o conhecimento exato do termo  $G(q)$  da equação (2.12), que é incluída na equação (3.1).

O controlador PID, por sua vez, pode fornecer um desempenho aceitável para algumas tarefas de grande amplitude e de movimentos com velocidades moderadas mas freqüentemente não atende as necessidades de tarefas com baixas velocidades e pequenos movimentos, onde os efeitos das não-linearidades das juntas (tais como *stick-slip*) podem ser dominantes no desempenho do sistema (ARMSTRONG, 1991). Quando são empregados baixas velocidades e pequenos movimentos, enquanto manipula-se grandes cargas, o desempenho degrada-se mais ainda. O manipulador pode exibir comportamentos *stick-slip*, ou seja, oscilações provocadas por ciclos limites. Em operações de manutenção de algumas plantas nucleares, o controle PID é tão ineficaz que é proibido até para implementação de tarefas relativamente simples (IAGNEMMA, 1997).

As figuras (3.1) e (3.2) expõem os diagramas de blocos usados para simulação em *MATLAB-SIMULINK* dos sistemas de controle usando os controladores PD e PID, respectivamente.



Um sistema em cascata pode ser observado na figura (3.3).

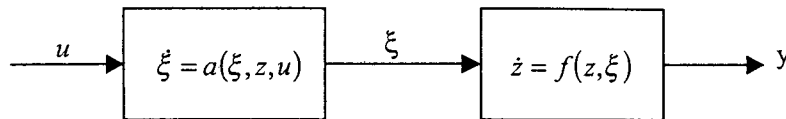


Figura 3.3: Estrutura de um sistema em cascata

É fundamental a observação da estrutura ilustrada na figura (3.3), onde o sinal de controle  $u$  entra apenas em uma parcela do sistema, denominado de subsistema  $\xi$ . Uma caracterização com respeito às propriedades do subsistema  $z$  e como estas podem ser influenciadas pela interconexão, representadas pela parcela  $\xi$ , são comentadas na seção 2.5.

Esta parcela pode agir tanto como a “entrada de controle” do subsistema  $z$ , quanto como uma perturbação externa. Esta diferença depende do tipo de realimentação realizada: realimentação parcial ou total do estado.

Na realimentação parcial do estado, apenas a parcela  $\xi$  do estado é utilizada para estabilizar o subsistema  $\xi$ , não devendo destruir as propriedades de estabilidade do subsistema  $z$ . Neste caso,  $\xi$  age como uma perturbação sobre o subsistema  $z$ . Quando todo o estado é realimentado,  $\xi$  é considerado como a entrada de controle do subsistema  $z$ , enquanto a lei de controle  $u$  deve ser projetada de forma a estabilizar ambos os subsistemas (Lopes, 1997). Isto será feito como segue.

Considere-se um sistema dinâmico descrito pelas seguintes equações diferenciais não lineares:

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, t) + B_1 x_2 \quad (3.3)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, t) + B_2(x_1, x_2, t)u \quad (3.4)$$

onde  $B_1$  é uma matriz constante,  $x_1 \in \mathfrak{R}^{n-m}$ ;  $x_2, u \in \mathfrak{R}^m$ . Suponha-se que é desejado um seguimento parcial do estado, ou seja, que a parcela  $x_1$  do estado siga uma dada referência  $x_{1d}$ .

Definindo-se os erros de seguimento como:

$$\tilde{x}_1 = x_1 - x_{1d} \quad (3.5)$$

$$\tilde{x}_2 = x_2 - x_{2d} \quad (3.6)$$

e substituindo (3.3) e (3.4) em (3.5) e (3.6) respectivamente, tem-se:

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, t) + B_1 x_{2d} + B_1 \tilde{x}_2 \quad (3.7)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, t) + B_2(x_1, x_2, t) u \quad (3.8)$$

Da estrutura composta de (3.7) e (3.8), percebe-se que o sistema descrito pelo vetor de estados  $x = [x_1 \ x_2]^T$  de dimensão  $n$  pode ser interpretado como dois subsistemas conectados em série, onde o subsistema 1 (representado pela parcela  $x_1$  do estado) tem como entrada de controle a parcela  $x_{2d}$  e está sujeito a uma “perturbação” representada por  $\tilde{x}_2$ . A técnica de controle em cascata consiste em controlar o subsistema 1 através de  $x_{2d}$ , de forma que  $x_1$  siga  $x_{1d}$ , e controlar o subsistema 2 através de  $u$ , fazendo com que  $x_2$  siga  $x_{2d}$ . Por este motivo, o projeto do controlador divide-se em dois passos;

1. Estabelecer uma lei de controle  $x_{2d}$  tal que  $x_1$  siga  $x_{1d}$  na presença de uma perturbação  $\tilde{x}_2$ .
2. Estabelecer uma lei de controle  $u$  tal que  $x_2$  siga  $x_{2d}$ .

A seção seguinte mostra como esta metodologia se aplica ao robô hidráulico.

### 3.4 O Controle em Cascata Aplicado ao Robô Hidráulico

Para descrever (2.16) e (2.41) como um sistema em cascata, define-se a força hidráulica desejada como  $F_{hd}$  e o erro de seguimento de força hidráulica como

$$\tilde{F}_h = F_h - F_{hd} \quad (3.9)$$

Usando a Eq. (3.9), pode-se reescrever as equações (2.16) e (2.41) como:

$$H^*(q)\ddot{q} + C^*(q, \dot{q})\dot{q} + D^*(q)\dot{q} + G^*(q) = \bar{J}^T F_h + d \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \dot{F}_h = & [A_1 E_1(q, p_1, \text{sign}(x_v)) + A_2 E_2(q, p_2, \text{sign}(x_v))] x_v - \\ & - [A_1 F_1(q) + A_2 F_2(q)] \dot{q} - [A_1 D_1(q) + A_2 D_2(q)] C_m p_\Delta. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Deste modo, o sistema está no formato em cascata como definido nas equações (3.7) e (3.8), onde a equação (3.10) pode ser interpretada como um subsistema mecânico de segunda ordem atuado pela força desejada  $F_{hd}$ , sujeita à entrada de perturbação  $d = \bar{J}^T \tilde{F}_h$ . Como abordado no capítulo 2, a equação (3.11) representa o subsistema hidráulico.

Sabendo-se que o controle no espaço das juntas aplica-se ao seguimento de uma trajetória desejada  $q_d(t)$ , o controlador em cascata pode ser resumido em dois passos:

- i. Estabelecer uma lei de controle  $F_{hd}(t)$  para o subsistema mecânico, definida na Eq. (3.12), de tal forma que sua saída, representada pelo deslocamento das juntas, siga uma trajetória desejada  $q_d(t)$  na presença da perturbação  $d$ ;
- ii. Estabelecer uma lei de controle “ $u$ ” para o subsistema hidráulico, definida na Eq. (2.40), tal que  $F_h(t)$  siga  $F_{hd}(t)$  definido em (i).

Considera-se o manipulador hidráulico definido nas equações (2.16) e (2.41), a seguir destacam-se as leis de controle para os subsistemas mecânico e hidráulico respectivamente.

### 3.4.1. Seguimento no Subsistema Mecânico

A lei de controle matricial para o seguimento de trajetória desejada no subsistema mecânico é calculada por:

$$F_{hd} = (\bar{J}_n^T)^{-1} (H_n^*(q)\ddot{q}_r + C_n^*(q, \dot{q})\dot{q}_r + D_n^*(q)\dot{q}_r + G_n^*(q) - K_D s) \quad (3.12)$$

onde o subscrito “n” representa os parâmetros nominais, ou as funções calculadas em parâmetros nominais,  $K_D$  é uma constante positiva,  $q_r$  é a posição de referência,  $\dot{q}_r$  é a velocidade de referência, e  $s$  é uma medida do erro de seguimento de trajetória. A velocidade de referência pode ser obtida pela modificação da velocidade desejada  $\dot{q}_r$  como segue:

$$\dot{q}_r = \dot{q}_d - \lambda \tilde{q}, \quad (3.13)$$

$$\tilde{q} = q - q_d, \quad (3.14)$$

$$s = \dot{q} - \dot{q}_r = \dot{\tilde{q}} + \lambda \tilde{q}, \quad (3.15)$$

onde  $\lambda$  é uma constante positiva e  $\tilde{q}$  é o erro do seguimento de trajetória das juntas. A equação (3.12) está de acordo com os fundamentos da lei de controle apresentada por (SLOTINE E LI, 1991) para robôs manipuladores, destacando os termos “feedforward”  $(H_n^*(q)\ddot{q}_r + C_n^*(q, \dot{q})\dot{q}_r + D_n^*(q)\dot{q}_r + G_n^*(q))$  e a componente proporcional derivativa  $(K_D s)$ .

Substituindo a equação (3.12) na equação (3.10) pode-se escrever a equação da dinâmica do erro no subsistema mecânico:

$$H^*(q)\dot{s} + (C^*(q, \dot{q}) + K_D)s = \bar{J}^T \tilde{F}_h. \quad (3.16)$$

Admite-se a seguinte função não negativa

$$2V_1 = s^T H^*(q)s + \tilde{q}^T K_1 \tilde{q} \quad (3.17)$$

onde  $K_I = K_I^T > 0$  é definida na seqüência. A derivada da equação (3.17) em relação ao tempo é

$$\dot{V}_1 = s^T (H^*(q)\dot{s} + \frac{1}{2}\dot{H}^*(q)s) + \tilde{q}^T K_1 \dot{\tilde{q}}. \quad (3.18)$$

Substituindo a equação (3.16) na equação (3.18) e usando a propriedade da assimetria de  $[\dot{H} - 2C]$  (SCIAVICCO E SICILIANO, 1996), obtém-se

$$\dot{V}_1 = s^T [\bar{J}^T \tilde{F}_h - (\bar{J}^T B_v \bar{J} + K_D)s] + \tilde{q}^T K_1 \dot{\tilde{q}}. \quad (3.19)$$

A equação (3.19) é usada na análise de estabilidade apresentada na seção 3.6.

### 3.4.2. Seguimento no Subsystema Hidráulico

Para garantir o seguimento de trajetória no subsystema hidráulico da equação (3.11) a posição do carretel da válvula de cada atuador é dada pela lei de controle matricial

$$u = \hat{u} - K_p \tilde{F}_h \quad (3.20)$$

onde  $K_p$  é uma constante positiva e o vetor lei de controle  $\hat{u}$  é uma lei de controle nominal, projetada de acordo com os parâmetros nominais do manipulador, além disso,  $K_p = K_p^T > 0$  é uma matriz de projeto.

O projeto de  $\hat{u}$  e  $K_p$  é baseado na função não negativa:

$$2V_2 = \tilde{F}_h^T \tilde{F}_h \quad (3.21)$$

Derivando  $V_2$  em relação ao tempo, usando a equação 3.11, considerando os erros de força hidráulica  $\tilde{F}_h(t)$  e a lei de controle definida na equação (3.20), obtém-se

$$\dot{V}_2 = -\tilde{F}_h^T \left[ (u^* - \hat{u}) + K_p \tilde{F}_h \right] \quad (3.22)$$

onde

$$u^* = \left[ A_1 E_1(q, p_1, \text{sign}(u^*)) + A_2 E_2(q, p_2, \text{sign}(u^*)) \right]^{-1} \cdot \left[ \dot{F}_{hd} + R \bar{J} \dot{q} + S C_{in} p \Delta \right] \quad (3.23)$$

sendo:

$$R = [A_1 F_1(q) + A_2 F_2(q)] \text{ e } S = [A_1 D_1(q) + A_2 D_2(q)]$$

A equação (3.22) é usada na seção 3.6.

De acordo com o esquema de controle proposto, o deslocamento do carretel da válvula de cada atuador “u” é calculado através da relação

$$u = \hat{u} - K_p (F_h - F_{hd}) \quad (3.24)$$

com o controle nominal  $\hat{u}$  dado por

$$\hat{u} = \left[ \hat{A}_1 \hat{E}_1(q, p_1, \text{sign}(\hat{u})) + \hat{A}_2 \hat{E}_2(q, p_2, \text{sign}(\hat{u})) \right]^{-1} \cdot \left[ \dot{F}_{hd} + \hat{R} \bar{J} \dot{q} + \hat{S} \hat{C}_{in} p \Delta \right] \quad (3.25)$$

sendo:

$$\hat{R} = [\hat{A}_1 \hat{F}_1(q) + \hat{A}_2 \hat{F}_2(q)] \text{ e } \hat{S} = [\hat{A}_1 \hat{D}_1(q) + \hat{A}_2 \hat{D}_2(q)]$$



A derivada da força hidráulica desejada  $\dot{F}_{hd}$  na equação (3.25) é a derivada da equação (3.22), onde seu cálculo envolve a computação das relações  $\frac{d^3}{dt^3}(q_r) = q_r^{(3)}$  e  $\frac{d}{dt}(s) = \dot{s}$ . Das Eq's. (3.13) à (3.15), verifica-se a necessidade conhecer as acelerações nas juntas para o cálculo de  $\dot{F}_{hd}$ . Admitindo-se o caso em que todos os parâmetros são conhecidos,  $\ddot{q}$  pode ser calculado pela equação (2.16). Adotando este procedimento obtém-se:

$$\begin{aligned} \dot{F}_{hd} = & \frac{d(\bar{J}_n^{r-1})}{dt} (H_n^*(q)\ddot{q}_r + C_n^*(q, \dot{q})\dot{q}_r + D_n^*(q)\ddot{q} + G_n^*(q) - K_D\dot{s}) + \\ & (\bar{J}_n^{r-1}) (H_n^*(q)\ddot{q}_r + \dot{H}_n^*(q)\dot{q}_r + C_n^*(q, \dot{q})\dot{q}_r + \dot{C}_n^*(q, \dot{q})\dot{q}_r + \dot{D}_n^*(q)\dot{q}_r) + \dots \quad (3.26) \\ & + (\bar{J}_n^{r-1}) (D_n^*(q)\ddot{q}_r + \dot{G}_n^*(q) - K_D\dot{s}) \end{aligned}$$

Pode-se notar de (3.23) e (3.26) que, no caso em que os parâmetros do subsistema mecânico são conhecidos, o sinal  $u^*$  é obtido medindo  $q$ ,  $\dot{q}$ ,  $F_h$ , isto é, o vetor de estados associado ao sistema (2.16) e (2.41).

Observa-se que os termos  $\hat{E}_1(q, p, \text{sign}(\hat{u}))$  e  $\hat{E}_2(q, p, \text{sign}(\hat{u}))$  da equação (3.25) são usados no cálculo da própria lei de controle  $\hat{u}$ , o que ocasiona um loop algébrico. Analisando o equacionamento, conclui-se que tal problema é contornado através da alteração do sinal responsável pelo cômputo dos termos  $\hat{E}_1(q, p, \text{sign}(\hat{u}))$  e  $\hat{E}_2(q, p, \text{sign}(\hat{u}))$ . Como estes termos são dependentes de parcelas também encontradas em  $D_1(q)$ ,  $D_2(q)$ ,  $F_1(q)$  e  $F_2(q)$ , troca-se o sinal  $\hat{u}$  pelo sinal  $v$ , onde,

$$v = \left( \dot{F}_{hd} + \hat{R}\bar{J}\dot{q} + \hat{S}\hat{C}_{in} p_\Delta \right), \quad (3.27)$$

surte o mesmo efeito. Este argumento está baseado no fato de que a única diferença entre estes sinais, está relacionada a multiplicações por constantes positivas. Portanto, elimina-se o loop algébrico. O simulador descrito no apêndice A destaca detalhadamente a implementação que contorna o loop algébrico.

### 3.5 Análise de Estabilidade do Controlador em Cascata

A combinação dos algoritmos de seguimento descrita na seção 3 compõe o controlador em cascata (GUENTHER e DE PIERI, 1997). Neste caso o sistema em malha fechada é dado pelo seguinte conjunto de equações:  $\Omega = \{(3.10)(3.11)(3.12)(3.20)\}$ .

Seja  $\rho = [\tilde{q}^T \quad \dot{\tilde{q}}^T \quad \tilde{F}_h^T]^T$  o vetor de erros de seguimento de  $\Omega$ .

Para demonstrar a estabilidade exponencial do sistema de malha fechada  $\Omega$  utiliza-se o lema de convergência apresentado a seguir.

Lema (Slotine e Li, 1991) – Se uma função real  $V(t)$  satisfaz a desigualdade

$$\dot{V}(t) + \alpha V(t) \leq 0, \quad (3.28)$$

onde  $\alpha$  é um número real positivo, então

$$V(t) \leq V(0)e^{-\alpha t}. \quad (3.29)$$

Prova: Seja a função  $Z(t)$  definida por:

$$Z(t) = \dot{V} + \alpha V \quad (3.30)$$

A equação (3.28) implica que  $Z(t)$  é não positivo. A solução da equação de primeira ordem (3.30) é

$$V(t) = V(0)e^{-\alpha t} + \int_0^t e^{-\alpha(t-r)} Z(t) dr \quad (3.31)$$

Como  $Z(t)$  é não positivo, o segundo termo do lado direito da equação é não positivo, então

$$V(t) \leq V(0)e^{-\alpha t} \quad (3.32)$$

Teorema – O sistema  $\Omega$  descrito anteriormente é exponencialmente estável em relação à origem do vetor de erros de seguimentos  $\rho$ .

Prova – Considere a função de Lyapunov

$$V = V_1 + V_2 = \frac{1}{2} \rho^T N_1 \rho \quad (3.33)$$

onde  $V_1$  e  $V_2$  foram definidas em (3.17) e (3.21), respectivamente. A matriz  $N_1$  resultante é

$$N_1 = \begin{bmatrix} \lambda^T H^*(q)\lambda + K_1 & H^*(q)\lambda & 0 \\ \mathcal{X} H^*(q) & H^*(q) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.34)$$

Para o caso em que os parâmetros do manipulador são conhecidos  $\hat{u} = u^*$ . Então, de acordo com as equações (3.19) e (3.22), a derivada da Eq. (3.33) em relação ao tempo é

$$\dot{V} = s^T [\bar{J}^T \tilde{F}_h - (\bar{J}^T B_v \bar{J} + K_D) s] + \tilde{q}^T K_1 \dot{\tilde{q}} - \tilde{F}_h^T K_p \tilde{F}_h. \quad (3.35)$$

Usando as equações (3.13) à (3.15) e definindo  $K_1 = 2(\bar{J}^T B_v \bar{J} + K_D)\lambda$ , tem-se

$$\dot{V} = -\rho^T N_2 \rho \quad (3.36)$$

onde

$$N_2 = \begin{bmatrix} \mathcal{X} (\bar{J}^T B_v \bar{J} + K_D) \lambda & 0 & -\frac{1}{2} \lambda^T \bar{J}^T \\ 0 & (\bar{J}^T B_v \bar{J} + K_D) & -\frac{1}{2} \bar{J}^T \\ -\frac{1}{2} \lambda^T \bar{J}^T & -\frac{1}{2} \bar{J}^T & K_p \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Seja  $\lambda_{\min}(A)$  o menor autovalor de uma matriz  $A$ . Escolhendo valores suficientemente grandes para  $\lambda_{\min}(K_D)$  e  $\lambda_{\min}(K_P)$ , e usando o teorema de Gershgorin (Lewis, Abdallah, Dowson, pp. 20, 1993), pode-se garantir que  $N_2 > 0$ , e

$$\dot{V}(t) = -\rho^T N_2 \rho \leq 0 \quad \forall \rho \neq 0 \quad (3.38)$$

Das equações (3.33) e (3.38) pode-se escrever,

$$\dot{V}(t) \leq -\alpha V(t) \quad (3.39)$$

onde  $\alpha > 0$ . Assim, usando o lema de convergência (SLOTINE E LI, 1991), a equação (3.39) permite escrever,

$$V(t) \leq V(0)e^{-\alpha t}. \quad \text{c.q.d.} \quad (3.40)$$

Sendo assim, o enunciado do teorema é uma consequência direta da equação (3.40).

A figura 3.4 exibe um diagrama de blocos do controlador em cascata.

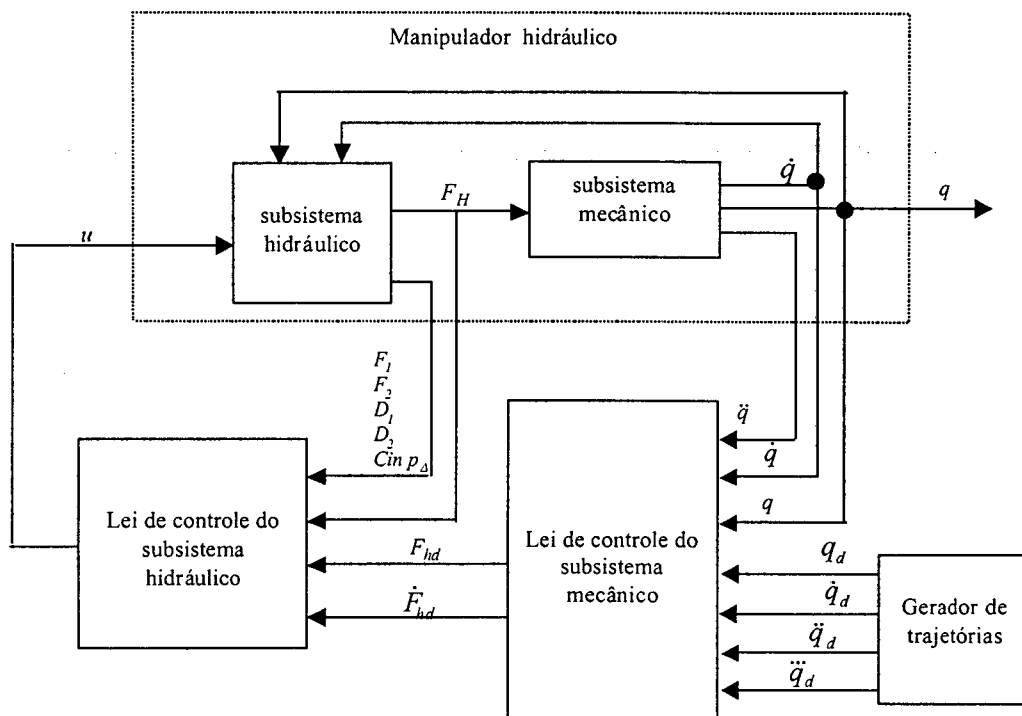


Figura 3.4: Diagrama de blocos do controlador em cascata

### 3.6 Conclusões

A estrutura das equações do robô hidráulico possibilitou a formulação da proposta de uma técnica de controle em cascata inspirada na interpretação de sistemas interconectados.

O problema do loop algébrico na implementação da lei de controle do subsistema hidráulico foi exibido e, em seguida, foi exposta uma forma de como contorná-lo.

A estabilidade dos sistemas interconectados foi analisada através do método direto de Lyapunov. Dessa análise conclui-se que o sistema é exponencialmente estável com relação ao vetor de erros de trajetória se os parâmetros do sistema são completamente conhecidos.

No próximo capítulo, descrevem-se os resultados de simulação do controlador em cascata apresentado neste capítulo.

## CAPÍTULO 4.

# RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

RESUMO: Apresentam-se simulações de um exemplo de robô manipulador hidráulico.

### 4.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado um modelo para simulação do robô hidráulico, que posteriormente será utilizado para testar as estratégias de controle.

Na seqüência, é mostrado como são realizadas as simulações através da exposição dos diagramas de blocos e também como é determinada a trajetória desejada para o robô manipulador hidráulico. É feito o levantamento dos resultados das simulações e compara-se o desempenho da estratégia em cascata com o desempenho obtido usando uma estratégia clássica de controle.

Finalmente, analisa-se o desempenho do controlador em cascata diante de incertezas paramétricas e perturbações.

### 4.2 Especificação do Modelo para Simulação

Como foi destacado no capítulo 2, o modelo dinâmico do robô manipulador hidráulico é obtido utilizando as equações de Lagrange, do trabalho virtual, da vazão através de orifícios e da continuidade.

Para a realização do controle no espaço das juntas utiliza-se um robô manipulador com dois elos. Estes elos são acionados por atuadores hidráulicos lineares, como pode ser visto na figura 4.1.

A escolha do manipulador da figura 4.1, para as simulações, é justificada por sua posterior construção.

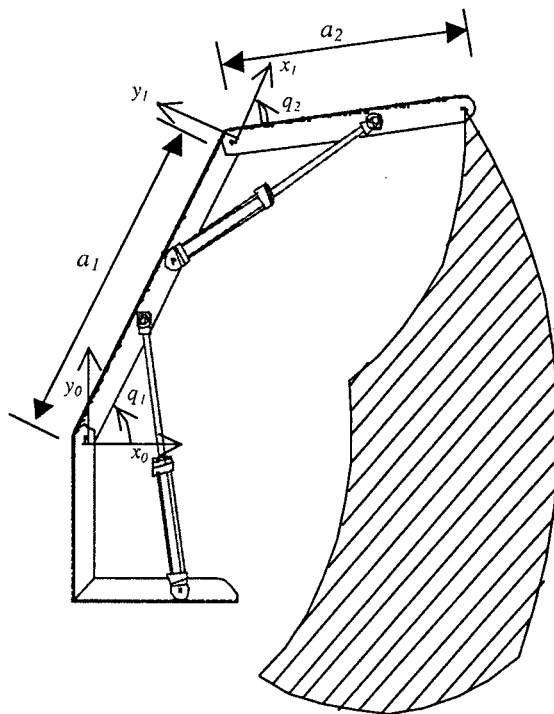


Figura 4.1: Manipulador Hidráulico com dois graus de liberdade

Os parâmetros nominais utilizados para este robô são baseados no trabalho de CUNHA, 2001 e são apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2:

	<i>Descrição</i>	<i>Nominal</i>	<i>Unidade</i>
$a_1; a_2$	Comprimentos dos elos.	1; 0.8	[m]
$g$	Aceleração da gravidade	9.8	[m/s <sup>2</sup> ]
$m_{l1}; m_{l2}$	Massas dos elos	15; 12	[kg]
$l_1; l_2$	Distâncias dos centros de massa dos elos.	0.5; 0.4	[M]
$I_{l1}; I_{l2}$	Momentos de inércia dos elos	3.75; 2.24	[kg.m <sup>2</sup> ]

Tabela 4.1: Parâmetros nominais dos elos do robô hidráulico.

	<i>Descrição</i>	<i>Nominal</i>	<i>Unidade</i>
$m_{A1}, m_{A2}$	Massas dos atuadores.	2; 2	[kg]
$B_{VA1}, B_{VA2}$	Coeficientes de amortecimentos viscosos dos atuadores.	316	[N/m]
$A_{1A1}, A_{2A1},$ $A_{1A2}, A_{2A2}$	Áreas transversais das câmaras 1 e 2 dos atuadores 1 e 2.	$1.3 \times 10^{-3}; 1.3 \times 10^{-3};$ $7.6576 \times 10^{-4}; 7.6576 \times 10^{-4}$	[m <sup>2</sup> ]
$\beta$	Módulo de elasticidade volumétrica.	$10 \times 10^8$	[N/m <sup>2</sup> ]
$p_S$	Pressão de suprimento.	10	[Mpa]
$p_R$	Pressão de retorno.	0.1	[Mpa]
$k_1; k_2$	Constantes hidráulicas do sistema.	$6.5218 \times 10^{-8}$ $3.2609 \times 10^{-8}$	[m <sup>4</sup> .V <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> .N <sup>-1/2</sup> ]
$C_{in}$	Vazamento interno.	$1 \times 10^{-11}$	[m <sup>3</sup> /(s.Pa)]

Tabela 4.2: Parâmetros nominais dos atuadores do robô hidráulico.

O modelo dinâmico é especificado pelas seguintes matrizes (SCIAVICCO E SICILIANO, 1996):

- Matriz de Inércia dos Elos:

$$H(q) = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

onde:

$$H_{11} = I_{11} + m_{11} l_1^2 + I_{11} + m_{12} (a_1^2 + l_2^2 + 2a_1 l_2 \cos(q_2));$$

$$H_{12} = I_{12} + m_{12} (l_2^2 + a_1 l_2 \cos(q_2));$$

$$H_{21} = H_{12};$$

$$H_{22} = I_{12} + m_{12} l_2^2.$$

- Matriz de Forças de Coriolis e Centrífugas dos elos:

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$



onde:

$$h = -m_{12} a_1 l_2 \sin(q_2);$$

$$C_{11} = h \dot{q}_2;$$

$$C_{12} = h(\dot{q}_1 + \dot{q}_2);$$

$$C_{21} = -h \dot{q}_1$$

$$C_{22} = 0.$$

- Vetor das Forças Gravitacionais dos Elos:

$$G(q) = \begin{bmatrix} G_{11} \\ G_{21} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

onde:

$$G_{11} = (m_{11} l_1 + m_{12} a_1) g \cos(q_1) + m_{12} l_2 g \cos(q_1 + q_2);$$

$$G_{21} = m_{12} l_2 g \cos(q_1 + q_2).$$

Na seqüência, especificam-se as matrizes dos atuadores:

- Matriz das massas dos atuadores

$$M = \begin{bmatrix} m_{A1} & 0 \\ 0 & m_{A2} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

- Matriz das áreas transversais das câmaras 1 dos atuadores

$$A_1 = \begin{bmatrix} A_{1A1} & 0 \\ 0 & A_{1A2} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

- Matriz das áreas transversais das câmaras 2 dos atuadores

$$A_2 = \begin{bmatrix} A_{2A1} & 0 \\ 0 & A_{2A2} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

- Matriz dos coeficientes de amortecimentos viscosos dos atuadores

$$B_v = \begin{bmatrix} B_{vA1} & 0 \\ 0 & B_{vA2} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

- Vetor das componentes das forças gravitacionais dos atuadores (veja o apêndice B)

$$P_{AT} = \begin{bmatrix} m_{A1} g \cos(\psi_1) \\ m_{A2} g \cos(\psi_2) \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

onde  $\psi_1$  e  $\psi_2$  são os ângulos entre cada reta de deslocamento de cada atuador e a vertical.

### 4.3 Geração de Trajetórias

O problema de controle tratado nas simulações é o do seguimento de trajetória. Para tanto, a determinação dos valores desejados no espaço de juntas e da tarefa para a posição é feita a partir da relação existente entre estes dois espaços, ou seja, a partir da cinemática inversa do robô.

Diante do exposto, são consideradas as seguintes premissas:

1ª p) Independentemente do espaço em que está sendo implementada a lei de controle é necessário definir trajetórias suaves.

2ª p) Neste trabalho estas trajetórias compreendem: a posição, a velocidade, a aceleração e a derivada da aceleração (*jerk*). Esta última, é justificada por seu cálculo na força hidráulica desejada, como observado no capítulo 3.

3ª p) Deve-se estabelecer condições iniciais e finais até a terceira derivada da posição.

4ª p) Para a realização do controle direto no espaço das juntas, determina-se que o efetuador final do robô siga uma trajetória retilínea.

Baseado nessas premissas são estabelecidos os seguintes passos:

1º passo) Definir ao menos um polinômio de 7ª ordem para a interpolação da posição no espaço da tarefa.

Assim, os valores iniciais e finais das posições desejadas no espaço da tarefa são, respectivamente (ver figura 4.3):

$$x_0 = 1.1; y_0 = 0.1 \text{ m.}$$

$$x_f = 1.4; y_f = 0.5 \text{ m}$$

Esta etapa tem um período de duração de 0 a 4 segundos, sendo que:

$$\dot{x}_0 = \dot{y}_0 = 0; \quad \dot{x}_f = \dot{y}_f = 0;$$

$$\ddot{x}_0 = \ddot{y}_0 = 0; \quad \ddot{x}_f = \ddot{y}_f = 0;$$

$$\dddot{x}_0 = \dddot{y}_0 = 0; \quad \dddot{x}_f = \dddot{y}_f = 0.$$

Seja o polinômio de 7ª ordem:

$$x(t) = y(t) = a_7 t^7 + a_6 t^6 + a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0, \quad (4.9)$$

onde as suas derivadas são:

$$\dot{x}(t) = \dot{y}(t) = 7 a_7 t^6 + 6 a_6 t^5 + 5 a_5 t^4 + 4 a_4 t^3 + 3 a_3 t^2 + 2 a_2 t + a_1; \quad (4.10)$$

$$\ddot{x}(t) = \ddot{y}(t) = 42 a_7 t^5 + 30 a_6 t^4 + 20 a_5 t^3 + 12 a_4 t^2 + 6 a_3 t + 2 a_2; \quad (4.11)$$

$$\dddot{x}(t) = \dddot{y}(t) = 210 a_7 t^4 + 120 a_6 t^3 + 60 a_5 t^2 + 24 a_4 t + 6 a_3. \quad (4.12)$$

Seus coeficientes podem ser calculados através das seguintes equações:

$$a_0 = x_0; \quad a_1 = \dot{x}_0;$$

$$a_2 = \frac{\ddot{x}_0}{2}; \quad a_3 = \frac{\ddot{\ddot{x}}_0}{6};$$

$$a_4 = -\frac{1}{(6t_f^4)} \left( (210x_0 - 210x_f) + (120\dot{x}_0 + 90\dot{x}_f)t_f + (30\ddot{x}_0 - 15\ddot{x}_f)t_f^2 + (4\ddot{\ddot{x}}_0 + \ddot{\ddot{x}}_f)t_f^3 \right);$$

$$a_5 = -\frac{1}{(2t_f^5)} \left( (168x_0 - 168x_f) + (90\dot{x}_0 + 78\dot{x}_f)t_f + (20\ddot{x}_0 - 14\ddot{x}_f)t_f^2 + (2\ddot{\ddot{x}}_0 + \ddot{\ddot{x}}_f)t_f^3 \right);$$

$$a_6 = -\frac{1}{(6t_f^6)} \left( (420x_0 - 420x_f) + (216\dot{x}_0 + 204\dot{x}_f)t_f + (45\ddot{x}_0 - 39\ddot{x}_f)t_f^2 + (4\ddot{\ddot{x}}_0 + 3\ddot{\ddot{x}}_f)t_f^3 \right)$$

$$a_7 = -\frac{1}{(6t_f^7)} \left( (120x_0 - 120x_f) + (60\dot{x}_0 + 60\dot{x}_f)t_f + (12\ddot{x}_0 - 12\ddot{x}_f)t_f^2 + (\ddot{\ddot{x}}_0 + \ddot{\ddot{x}}_f)t_f^3 \right).$$

As figuras 4.2 e 4.3 ilustram as trajetórias desejadas no espaço da tarefa.

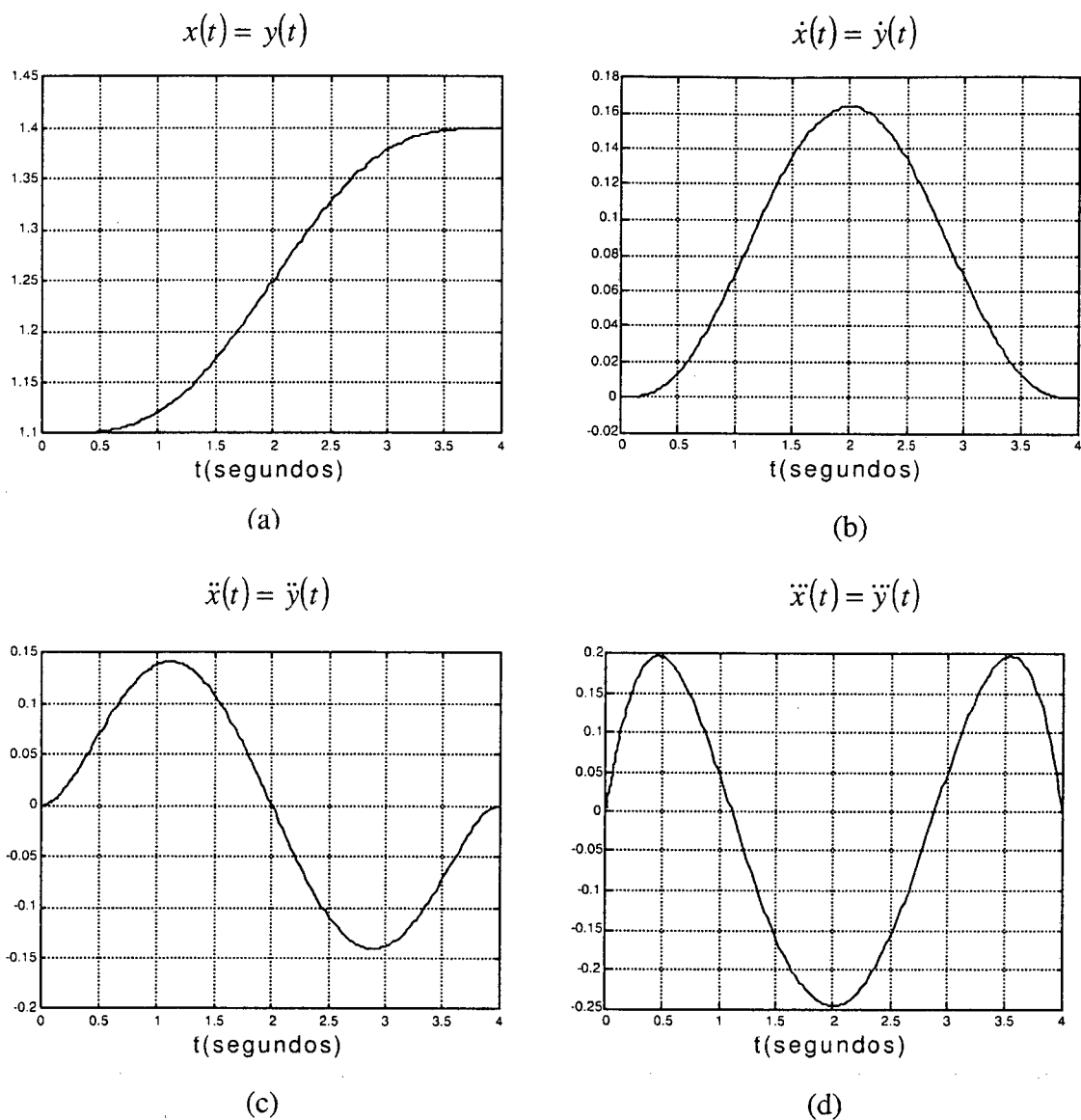


Figura 4.2: (a) - Posições (m), (b) - velocidades (m/s), (c) - acelerações (m/s<sup>2</sup>) e (d) - derivada das acelerações (m/s<sup>3</sup>) desejadas no espaço da tarefa.

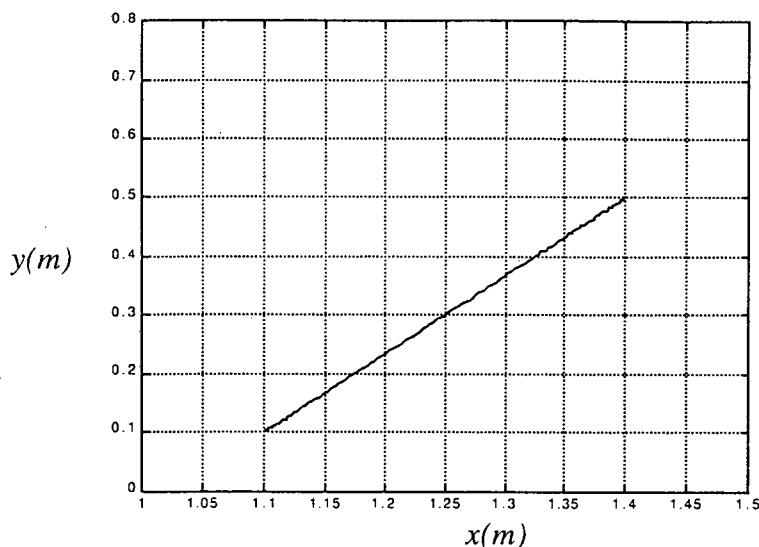


Figura 4.3: Trajetória desejada

2º passo) Com os dados das trajetórias desejadas obtidos no 2º passo e considerando o manipulador da figura 4.1, encontra-se as variáveis de junta  $q_1$  e  $q_2$  correspondendo à posição do efetuador final ( $X = [x; y]$ ).

Aplica-se na seqüência, a cinemática inversa para o cálculo das trajetórias no espaço das juntas.

A conversão para o espaço das juntas ocorre pelas seguintes relações cinemáticas:

$$\cos(q_{2d}) = \frac{x^2 + y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2 a_1 a_2} \quad (4.13)$$

onde a existência de uma solução é limitada por  $-1 \leq \cos(q_{2d}) \leq 1$ , pois, de outra forma, o ponto estará fora do espaço de trabalho alcançável. Assim sendo,

$$\sin(q_{2d}) = \pm \sqrt{1 - \cos^2(q_{2d})} \quad (4.14)$$

onde o sinal positivo é relativo a postura do cotovelo para baixo e negativo para a postura do cotovelo para cima. Assim, o ângulo  $q_{2d}$  pode ser calculado como:

$$q_{2d} = \text{atan2}(\sin(q_{2d}), \cos(q_{2d})) \quad (4.15)$$

Tendo determinado  $q_{2d}$ , o ângulo  $q_{1d}$  pode ser encontrado a partir da relação

$$\text{sen } q_{1d} = \frac{(a_1 + a_2 \cos(q_{2d}))y - a_2 \text{sen}(q_{2d})x}{x^2 + y^2} \quad (4.16)$$

que, analogamente ao caso anterior, leva a

$$q_{1d} = \text{atan2}(\sin(q_{1d}), \cos(q_{1d})) \quad (4.17)$$

As velocidades desejadas nas juntas são obtidas pelo mapeamento não-linear usando a inversa do jacobiano geométrico em função das posições desejadas nas juntas,

$$q_d = \begin{bmatrix} q_{1d} \\ q_{2d} \end{bmatrix},$$

ou seja,

$$\dot{q}_d = J^{-1}(q_d) \dot{X} \quad (4.18)$$

As acelerações desejadas nas juntas  $\ddot{q}_d$  são calculadas por:

$$\ddot{q}_d = J^{-1}(q_d, \dot{q}_d) \ddot{X} + \dot{J}^{-1}(q_d) \dot{X}. \quad (4.19)$$

Além disso, as derivadas das acelerações desejadas das juntas  $\ddot{q}_d$  são obtidas como se segue,

$$\ddot{\ddot{q}}_d = J^{-1}(q_d) \ddot{\ddot{X}} + 2 \dot{J}^{-1}(q_d, \ddot{q}_d) \ddot{X} + \ddot{J}^{-1}(q_d, \ddot{q}_d, \ddot{\ddot{q}}_d) \dot{X} \quad (4.20)$$

Pode-se observar nas equações anteriores que a inversa do jacobiano geométrico  $J^{-1}$  é uma função das posições desejadas nas juntas  $q_d$ , a primeira derivada do jacobiano geométrico  $\dot{J}^{-1}$  é uma função das posições desejadas nas juntas  $q_d$ , e das velocidades desejadas nas juntas  $\dot{q}_d$  e que a segunda derivada deste jacobiano é em função de  $q_d$ ,  $\dot{q}_d$  e das acelerações das juntas  $\ddot{q}_d$ .

A figura (4.4) ilustra as trajetórias das juntas para este caso.

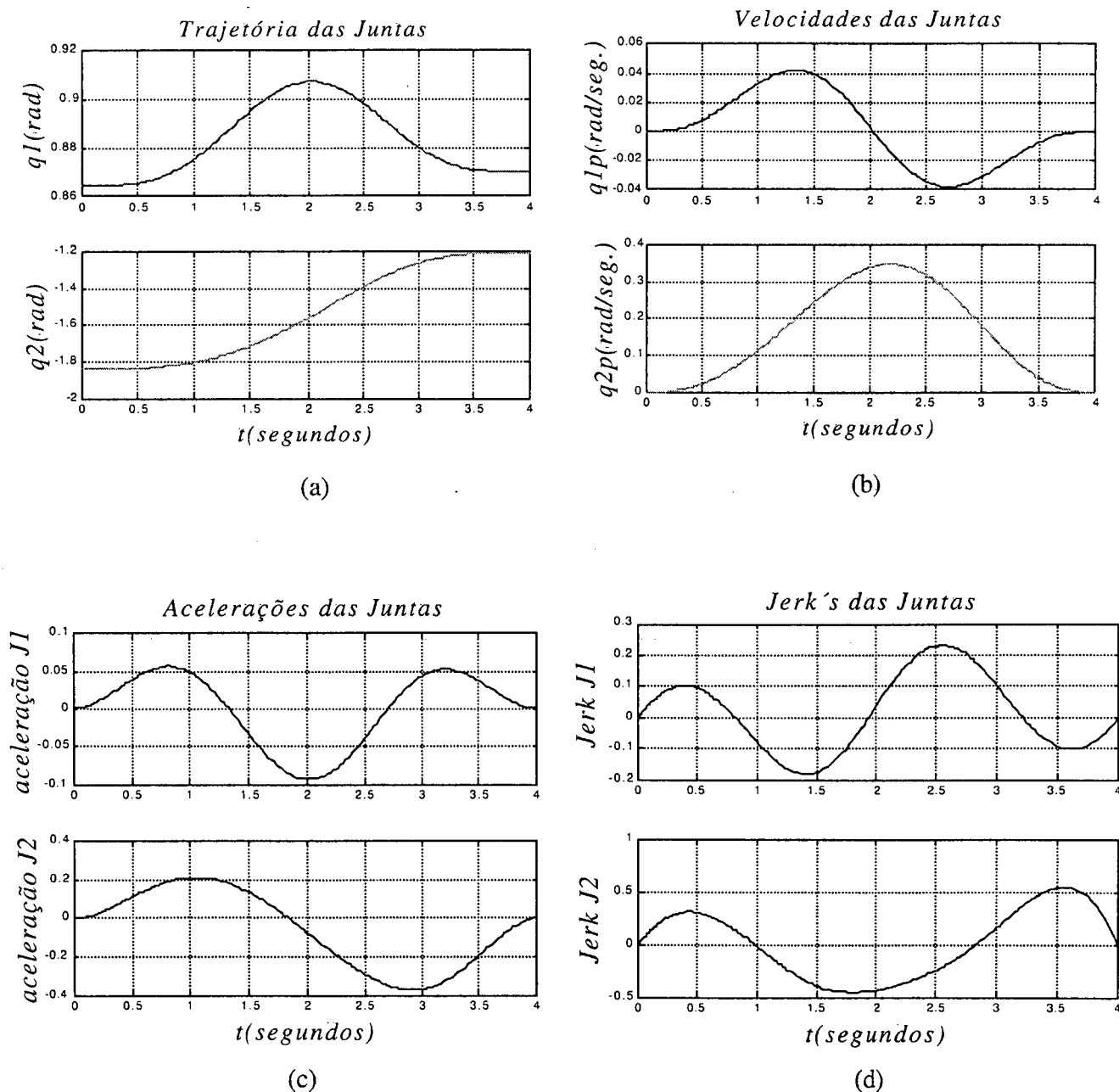


Figura 4.4: (a) Trajetórias, (b) - velocidades, (c) - acelerações e (d) - Jerk's das juntas.



As trajetórias dos cilindros destes atuadores também devem ser suaves, para evitar o desgaste das válvulas, que acionam os atuadores hidráulicos.

Relembrando as relações cinemáticas (2.4), (2.10) e (2.11), estas trajetórias são observadas na figura 4.5.

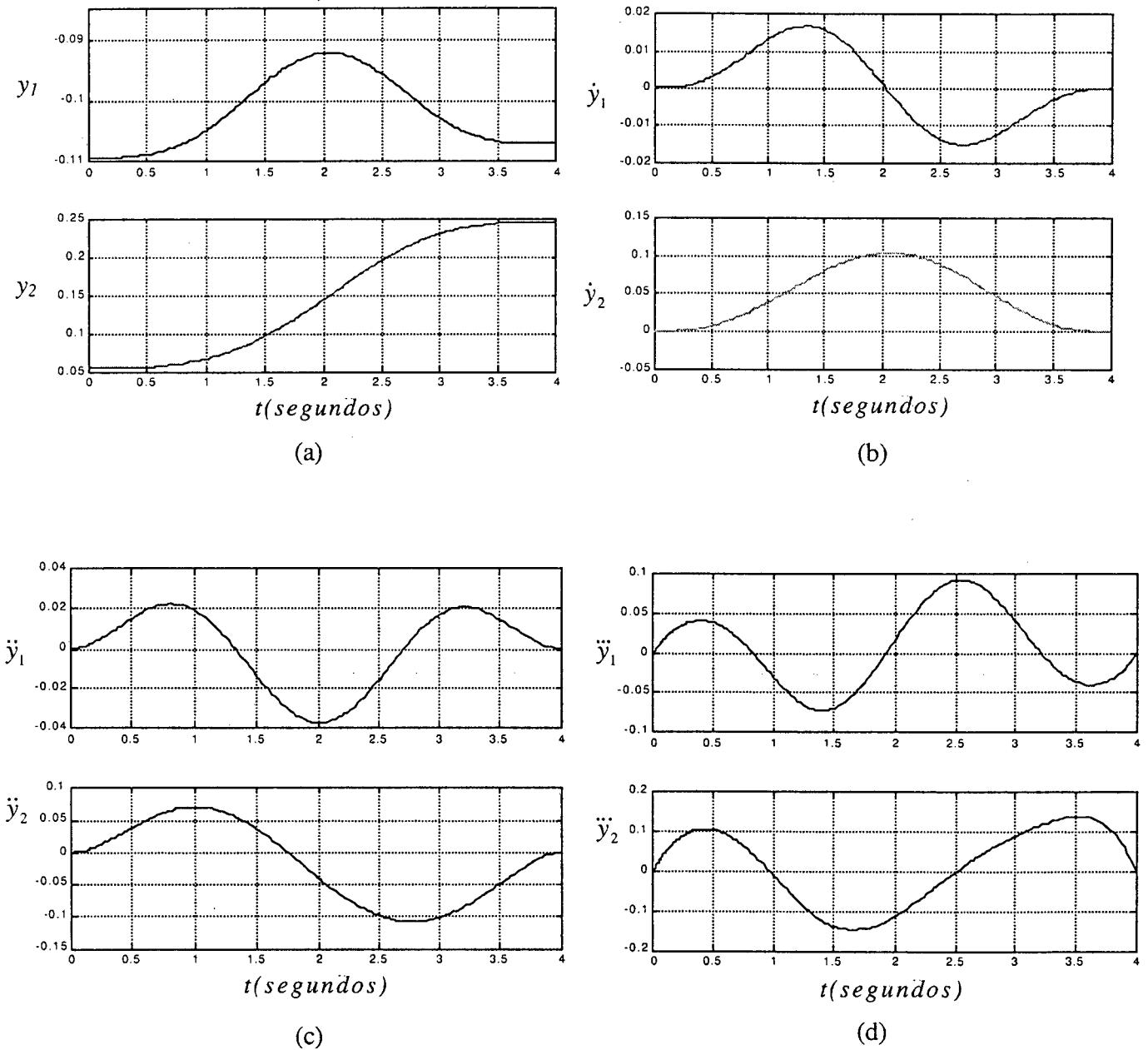


Figura 4.5: (a) - Trajetórias, (b) - velocidades, (c) - acelerações e (d) - Jerk's dos atuadores.

## 4.4 Resultados das Simulações:

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações de um manipulador hidráulico, com o objetivo de seu efetuator final seguir a trajetória definida na seção 4.3.

As simulações são realizadas com o sistema nominal e com o sistema sujeito a variações paramétricas e perturbações externas, a fim de ressaltar a robustez do controle em cascata.

### 4.4.1. Simulações com o Sistema Nominal

Compara-se o desempenho do controle em cascata proposto no capítulo 3 com um controlador PID na forma  $u_{PID} = P(q - q_d) + D(\dot{q} - \dot{q}_d) + I \int (q - q_d) dt$ , onde  $P$ ,  $D$ ,  $I$  são respectivamente os ganhos proporcional, derivativo e integral.

Os ganhos do controlador cascata são ajustados de acordo com o compromisso de evitar oscilação no sinal de controle, com o intuito de garantir a vida útil das válvulas e assumem os seguintes valores:

$$K_d = [20 \ 0; \ 0 \ 10];$$

$$K_p = [50 \ 0; \ 0 \ 50];$$

$$\lambda = [4 \ 0; \ 0 \ 4];$$

Assumindo o mesmo compromisso, os ganhos do PID são ajustados seguindo com os seguintes valores:

$$P = [8 \ 0; \ 0 \ 5],$$

$$D = [0.1 \ 0; \ 0 \ 0.1],$$

$$I = [300 \ 0; \ 0 \ 200].$$

Como citado anteriormente, estes ganhos foram estabelecidos considerando o compromisso de evitar ruídos no sinal de controle, pois os mesmos reduzem a vida útil das válvulas utilizadas nos atuadores.

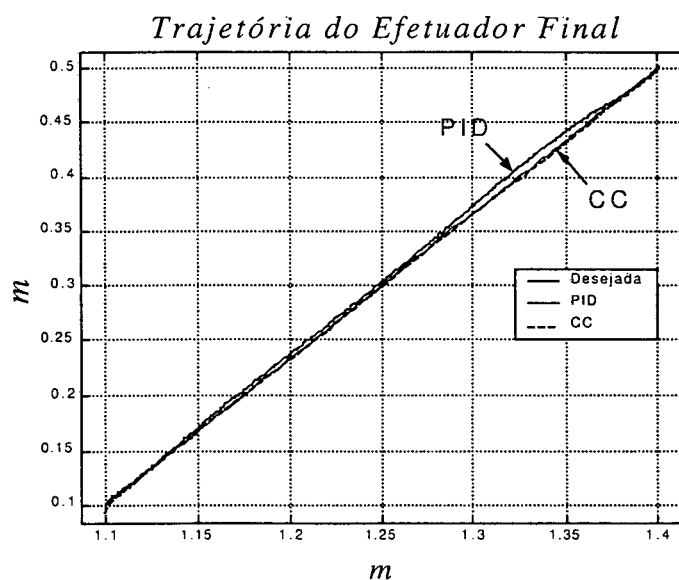


Figura 4.6: Trajetória do efetuator final

Para o problema de seguimento de trajetória, verifica-se na figura (4.7) que utilizando o controle em cascata obtém-se um erro de seguimento menor do que empregando o controle PID.

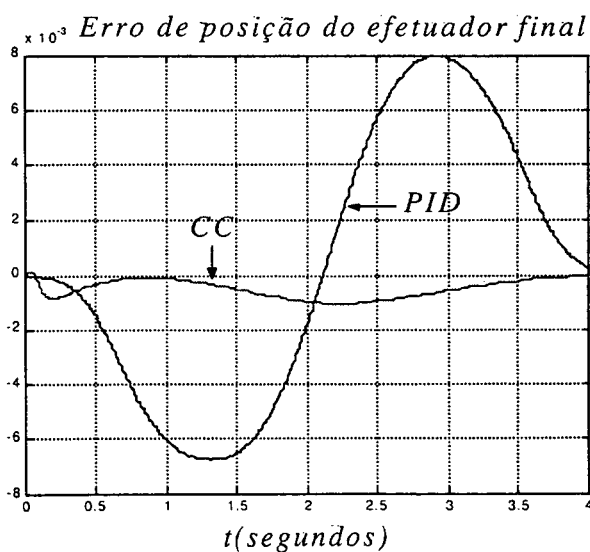
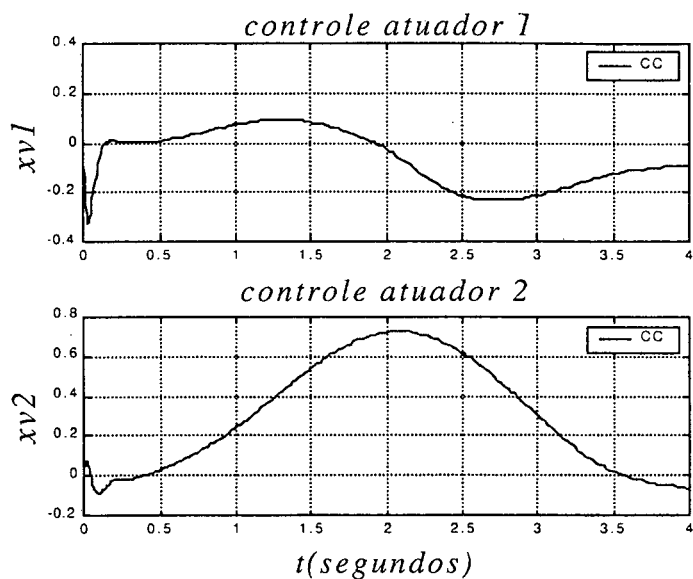
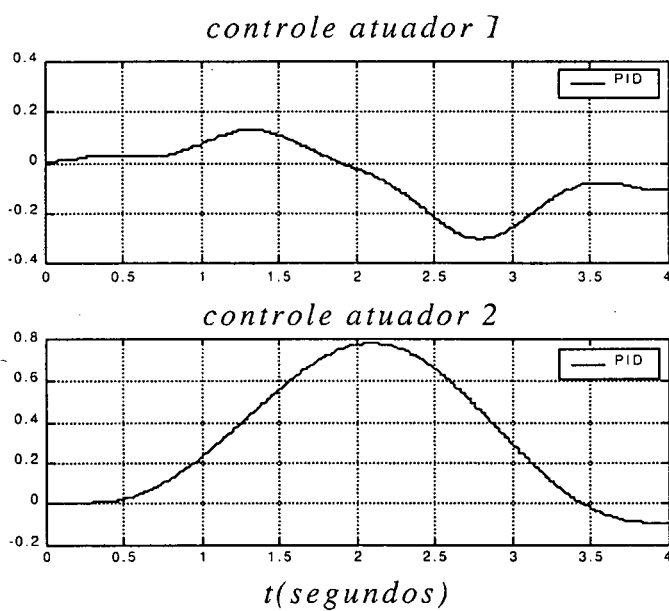


Figura 4.7: Erro de seguimento de trajetória do efetuator final.

Os sinais de controle, ilustrados na figura (4.8), são da mesma ordem de grandeza. Isto exibe a eficiência do método.



(a)



(b)

Figura 4.8: Esforço de controle: (a) - Controle em castata; (b) - PID.

#### 4.4.2 Simulações com Incertezas no Sistema

Nesta seção, apresentam-se os resultados usando controladores CC e PID quando o sistema está sujeito a incertezas paramétricas.

Com o objetivo de verificar a o comportamento dos controladores diante destas incertezas, aplica-se uma variação de  $\pm 50\%$  nos valores dos módulos de compressibilidade volumétrica ( $\beta$ ) dos atuadores além de acrescentar uma carga de 3 kg ao efetuator final, o que representaria uma incerteza na massa do segundo elo. Os resultados de simulação para uma variação de  $+50\%$  no módulo de compressibilidade volumétrica são exibidos nas figuras (4.9), (4.10) e (4.11).

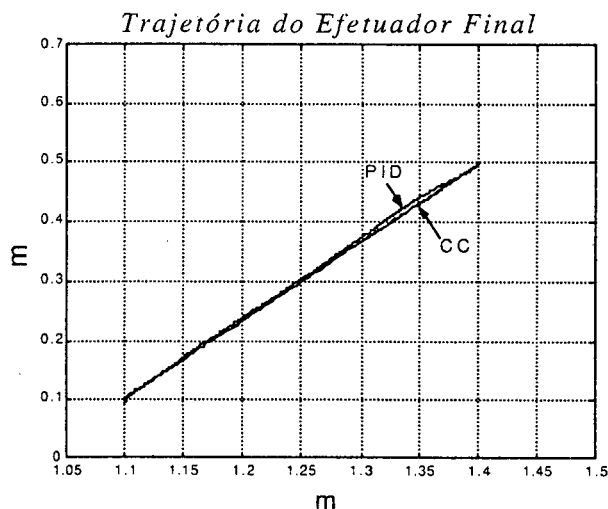


Figura 4.9: Trajetória no espaço da tarefa diante de variação de  $+50\%$  de  $\beta$ .

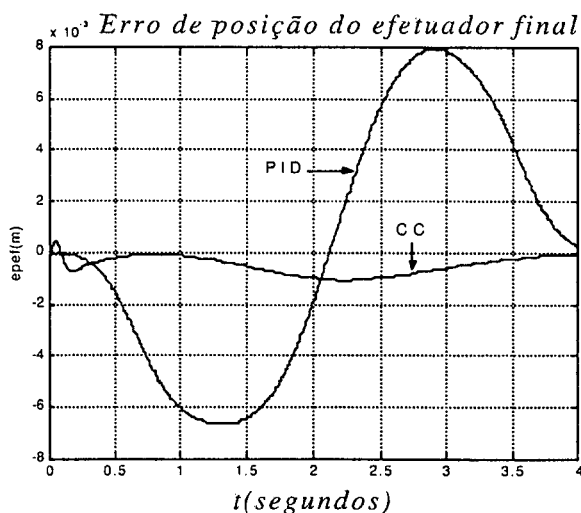
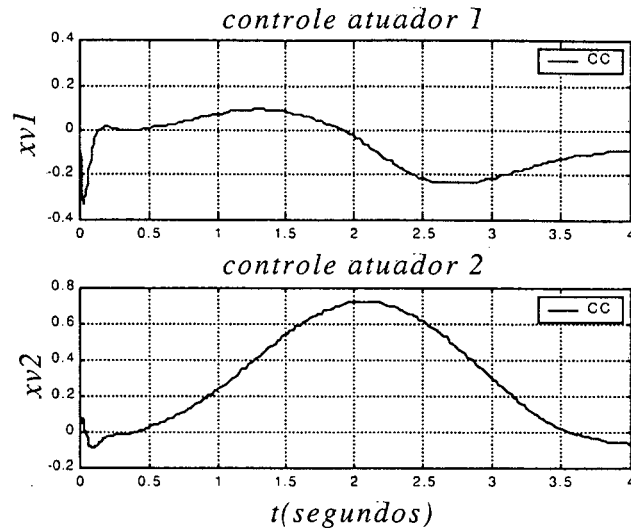
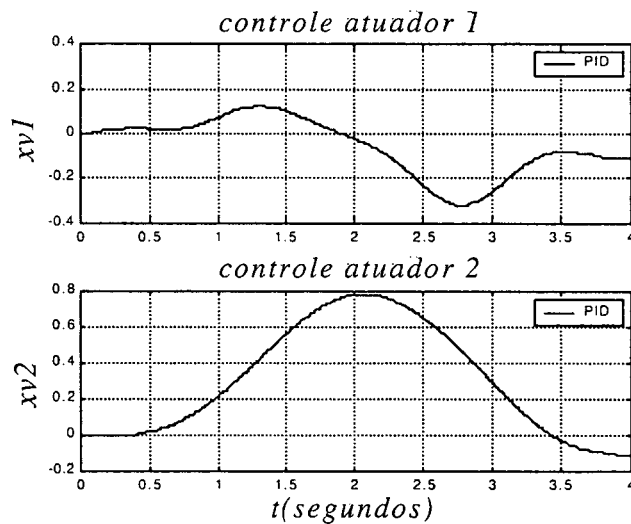


Figura 4.10: Erro de posição no espaço da tarefa diante de variação de  $+50\%$  de  $\beta$ .



(a)



(b)

Figura 4.11: Esforços de controle diante de +50% de  $\beta$ . (a) - CC (b) - PID.

Observa-se nos resultados das figuras anteriores que: para o controlador CC o erro de trajetória não sofre alteração em relação ao caso sem considerar a incerteza paramétrica, por outro lado, para o controlador PID ocorre uma pequena elevação do erro ao final da trajetória. Os sinais de controle para ambos controladores não sofreram alteração em comparação ao caso sem incertezas.

Os resultados de simulação para uma variação de - 50% no módulo de compressibilidade volumétrica são exibidos nas figuras (4.12), (4.13) e (4.14).

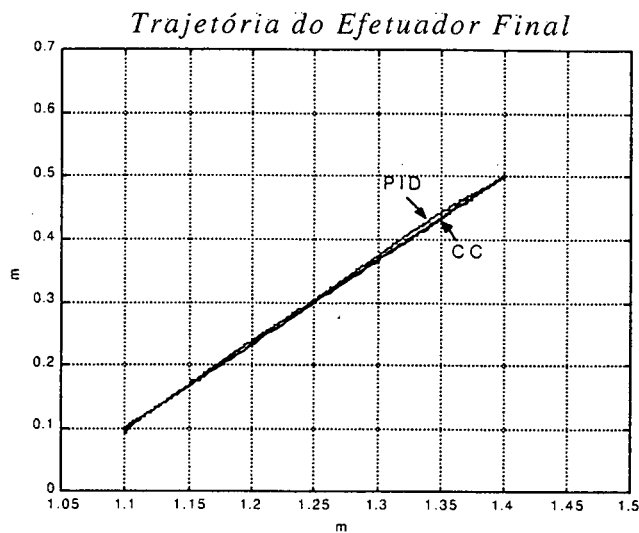


Figura 4.12: Trajetória no espaço da tarefa diante de -50% de  $\beta$ .

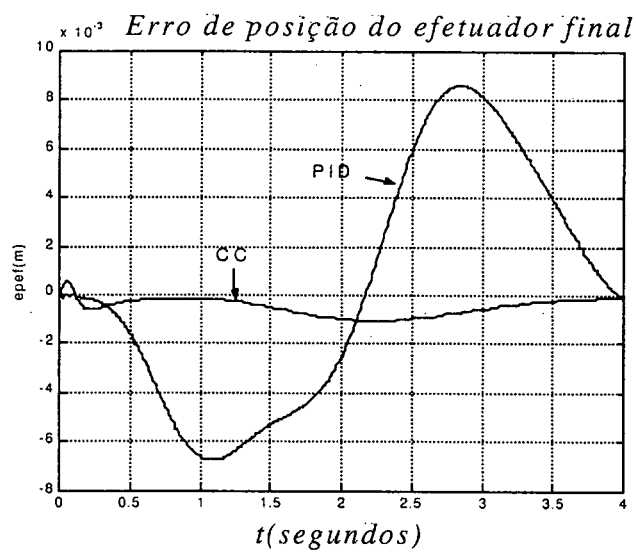
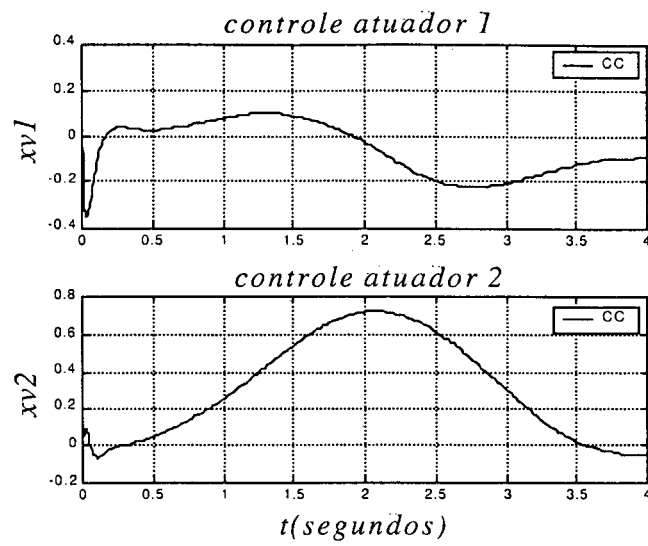
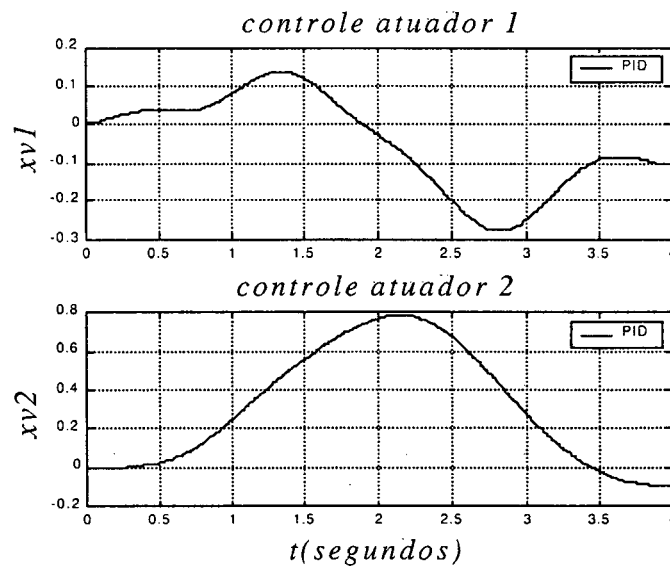


Figura 4.13: Erro de posição no espaço da tarefa diante de -50% de  $\beta$ .



(a)



(b)

Figura 4.14: Esforços de controle diante de -50% de  $\beta$ . (a) - CC (b) - PID.

Diante das simulações das figuras anteriores, percebe-se que o controlador CC não sofre alterações diante da incerteza de -50% de  $\beta$ , enquanto o controle PID apresenta um aumento do erro de trajetória no intervalo de 2.6 a 3 segundos. Os sinais de controle permanecem inalterados.



Com o objetivo de analisar a incerteza na massa do segundo elo, são desenvolvidas simulações que representam um acréscimo de 3kg a essa massa.

As figuras (4.15), (4.16) e (4.17) ilustram os resultados obtidos para ambos controladores, diante de tal incerteza.

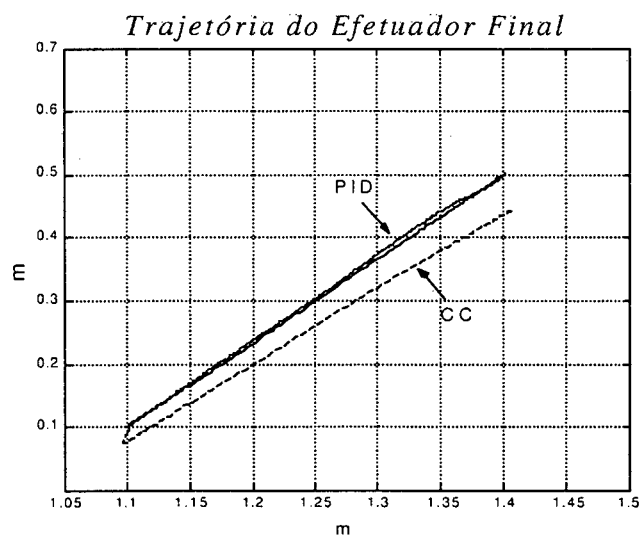


Figura 4.15: Trajetória diante de incerteza de +3 kg na carga do segundo elo.

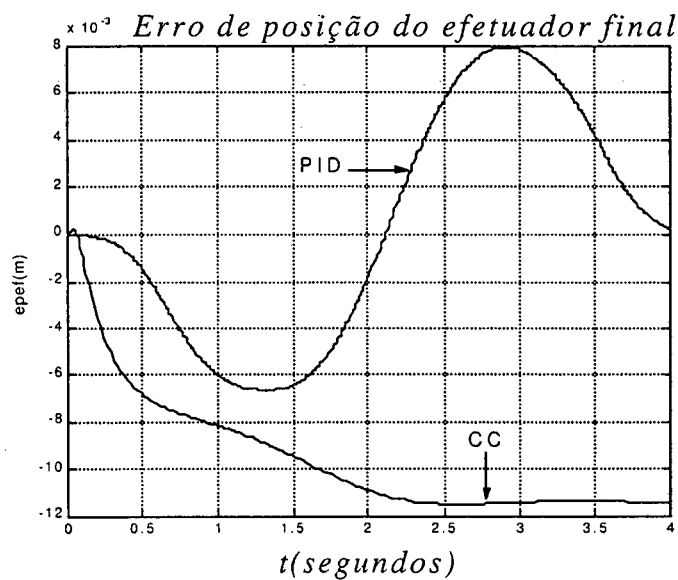
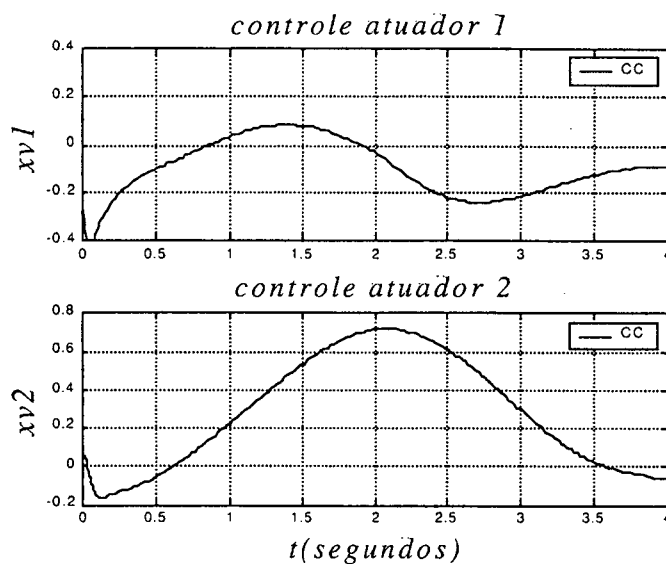
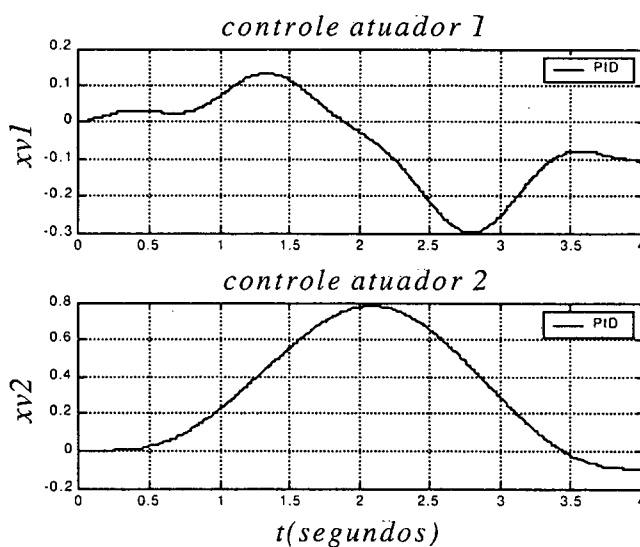


Figura 4.16: Erro de trajetória diante de incerteza de +3 kg na massa do segundo elo.



(a)



(b)

Figura 4.17: Esforços de controle diante de  $+3\text{kg}$  na massa do 2º elo. (a) - CC (b) - PID.

Nota-se nas simulações exibidas acima, que o controlador em cascata (CC) necessita de ganhos mais elevados, para garantir a robustez do robô nesta situação.

As figuras de (4.18) a (4.20) ilustram os resultados obtidos após o ajuste dos ganhos do controlador CC.

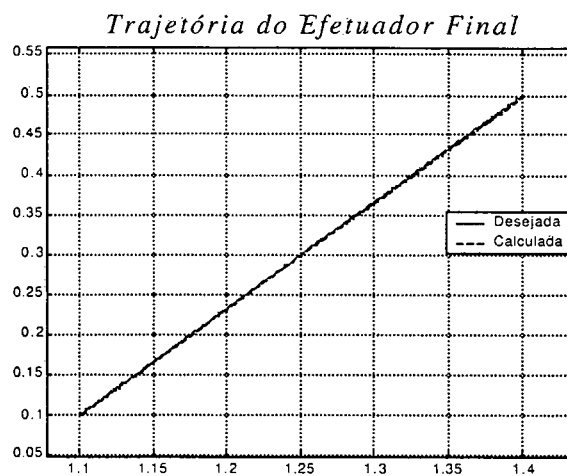


Figura 4.18: Trajetória no espaço da tarefa, com ajuste, diante da incerteza (CC).

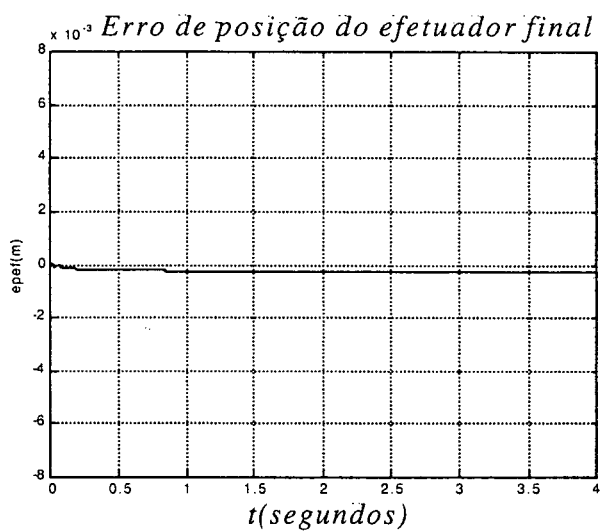


Figura 4.19: Erro de posição no espaço da tarefa, com ajuste, diante da incerteza (CC).

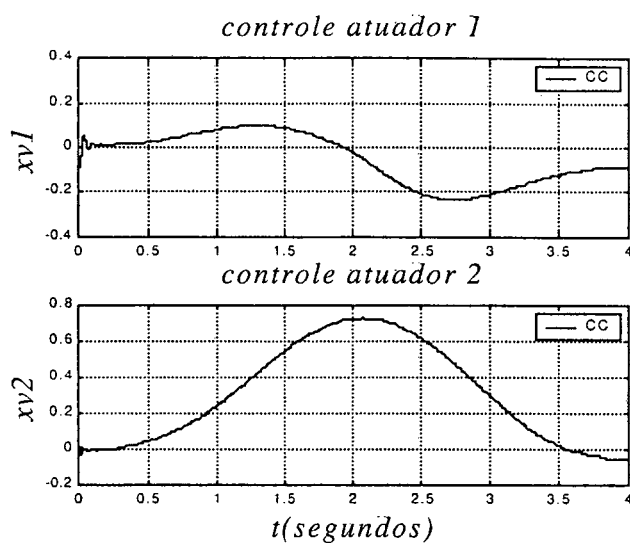


Figura 4.20: Esforço de controle, com ajuste, diante da incerteza (CC).

Diante dos resultados obtidos, observa-se uma melhoria da resposta no seguimento da trajetória. Apesar do sinal de controle do atuador 1 apresentar um pico inicial elevado, o mesmo mantém a mesma ordem de grandeza.

Com o objetivo de realizar uma análise comparativa, repetem-se as simulações para o controlador PID diante da incerteza de  $+3\text{kg}$  na massa do segundo elo.

As figuras de 4.21 a 4.23 exibem a resposta do sistema com o controlador **PID** diante da **perturbação** da mesma carga aplicada ao controle CC.

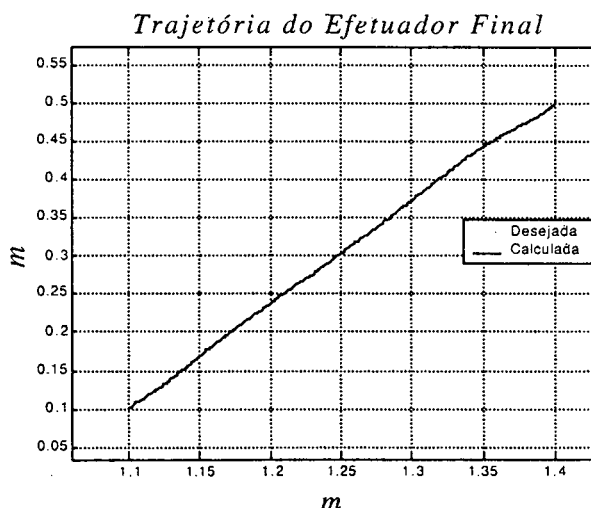


Figura 4.21: Trajetória no espaço da tarefa diante da perturbação (PID).

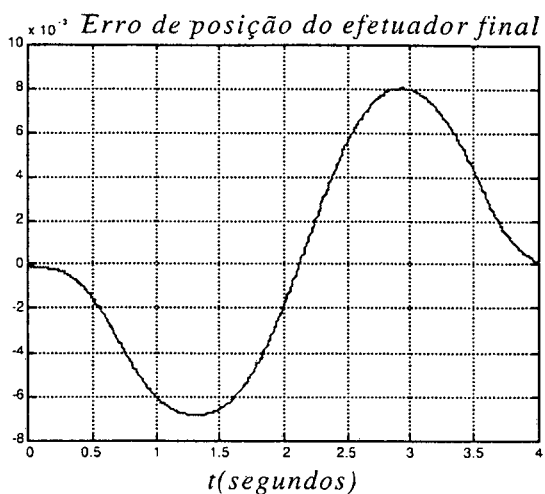


Figura 4.22: Erro de posição no espaço da tarefa diante de perturbação (PID).

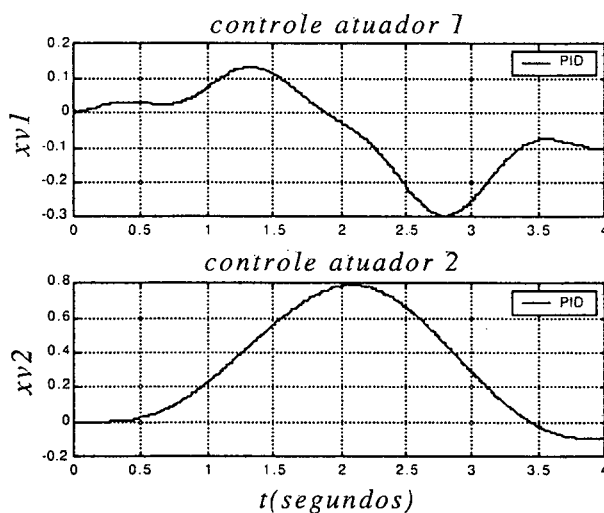


Figura 4.23: Esforço de controle diante de perturbação (PID).

Apesar de ter apresentado um erro de trajetória diante das incertezas paramétricas, o controle PID respondeu diante da perturbação da carga, da mesma forma que respondeu sem aquela perturbação. Isto ocorre devido aos altos ganhos integrais.

## 4.5 Conclusões

Diante das incertezas paramétricas, o controle em cascata respondeu de forma satisfatória. Entretanto, a incerteza de uma carga de 3 kg carregada pelo efetuator final exibiu a necessidade que este controle tem de sintonizar ganhos mais elevados para ser robusto diante destas e de outras perturbações.

Para tornar o controle CC do robô hidráulico mais robusto diante destas incertezas, propõe-se para trabalhos futuros, a utilização de algoritmos adaptativos e robustos na estrutura do controlador em cascata.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

### 5.1 Conclusões

No capítulo 2 deste trabalho foi apresentada a modelagem matemática dos robôs manipuladores acionados por atuadores hidráulicos lineares assimétricos. Nesta modelagem, descreveu-se uma metodologia geométrica que simplifica e generaliza a obtenção da matriz de transmissão do movimento linear dos atuadores em movimento rotacional dos elos destes robôs manipuladores. Na modelagem do subsistema mecânico, com base no princípio do trabalho virtual, a estrutura dos elos é agregada ao modelo mecânico dos atuadores. A modelagem do subsistema hidráulico é desenvolvida a partir das equações da vazão através de orifícios e da continuidade, as quais concebem a dinâmica dos atuadores lineares assimétricos daquele subsistema. Uma breve abordagem estabeleceu a interconexão entre os subsistemas mecânico e hidráulico.

O capítulo 3 expôs o problema do controle do robô hidráulico e foram discutidas as considerações da modelagem. A estrutura das equações do robô hidráulico possibilitou a formulação da proposta de uma técnica de controle em cascata inspirada na interpretação de sistemas interconectados. Esta técnica tem como principal mérito a redução da ordem do sistema e a conseqüente redução do esforço de controle. Foi abordado o problema do loop algébrico na implementação da lei de controle do subsistema hidráulico e foi proposta uma forma de como contorná-lo. A estabilidade dos sistemas interconectados foi analisada através do método direto de Lyapunov. Dessa análise conclui-se que o sistema é exponencialmente estável com relação ao vetor de erros de trajetória se os parâmetros do sistema são completamente conhecidos.

Durante as simulações do capítulo 4, considerando os parâmetros conhecidos, o controle em cascata apresenta um erro de trajetória bem menor em comparação ao controlador PID. Além disso, os esforços de controle de ambos controladores são de

mesma ordem de grandeza, o que ilustra a eficiência do controlador em cascata. Diante da incerteza paramétrica do módulo de elasticidade volumétrica, o controle em cascata respondeu de forma satisfatória. Entretanto, diante de uma incerteza de 3 kg na massa do 2º elo, observa-se a necessidade do controlador em cascata sintonizar ganhos mais elevados de forma a garantir a robustez.

## 5.2 Perspectivas

Pesquisas futuras incluem a implementação prática da estratégia de controle em cascata associada com procedimentos de projetos mais elaborados tais como técnicas de controle robusto e adaptativo aplicadas aos componentes hidráulicos e mecânicos.

Propõe-se acrescentar outras não-linearidades presentes ao sistema no modelo utilizado para o projeto dos controladores. Entre estas, destacam-se o atrito dos atuadores e das juntas, a dinâmica das válvulas e suas respectivas zonas mortas. Além disto, sugere-se estabelecer o acoplamento do controle deste robô hidráulico à estrutura de um submarino, de forma que a operação do manipulador seja robusta diante das perturbações do ambiente subaquático. Neste acoplamento, podem-se aplicar várias técnicas de controle, tais como as que utilizam inteligência artificial (redes neurais e lógica fuzzy) ou as de controle robusto, associadas ao controle em cascata. A parte experimental pode ser implementada através do protótipo do manipulador montado sobre uma plataforma móvel que simula as incertezas do ambiente subaquático.



# APÊNDICE A.

## O SIMULADOR DO CONTROLE EM CASCATA

### A.1 Introdução

Neste apêndice, descreve-se o simulador utilizado para a implementação da estratégia de controle em cascata (CC).

O programa utiliza a ferramenta computacional *MATLAB - Simulink*. Descrevem-se os principais diagramas de blocos e as rotinas agregadas aos mesmos (*MATLAB - Functions*). As equações que os diagramas de blocos representam são novamente destacadas dos capítulos anteriores.

A figura A.1 ilustra a interface do simulador.

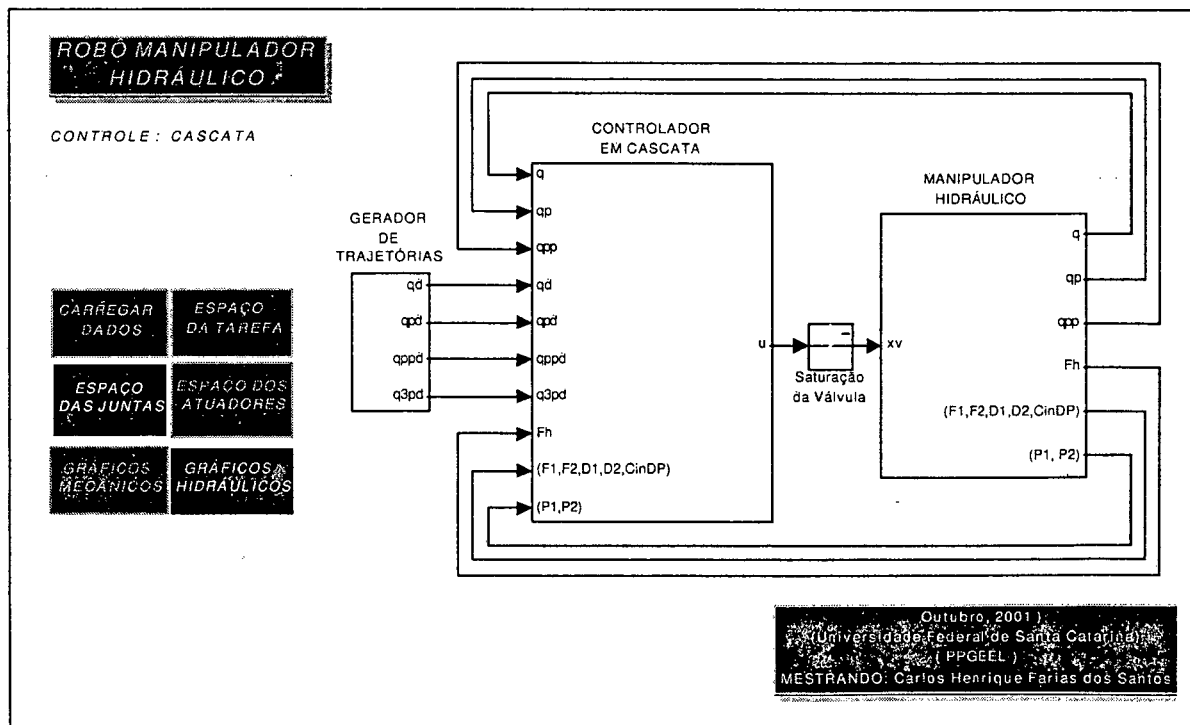


Figura A.1: Interface do simulador.

Ao clicar duas vezes no quadrado CARREGAR DADOS, aciona-se a rotina que inicia os valores dos parâmetros do sistema. A mesma é destacada em seguida.

```

%UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
%PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
%DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS
%LABORATÓRIOS: LCMI / LR / LASHIP
%ORIENTADOR: RAUL GUENTHER
%CO-ORIENTADOR: EDSON DE PIERI
%MESTRANDO: CARLOS HENRIQUE FARIAS DOS SANTOS

clear all %limpar área de trabalho

%SIMULAÇÃO DO MANIPULADOR HIDRÁULICO COM 2 GRAUS DE LIBERDADE*****
%*****DADOS PRINCIPAIS*****
%*****Dados do Manipulador*****:

global a1 a2 g l1 l2 m11 m12 I11 I12

a1=1;
a2=0.8;
g=9.8;
l1=0.5; l2=0.4;
m11=15; m12=12;
I11=m11*l1^2;

%*****DADOS DO ATUADOR*****

%Coordenadas da localização física dos atuadores:

%Atuador 1:

global L11 L12 Dfi LA1

Xa1=0.821;
Ya1=-0.157;
Xb1=-0.6;
Yb1=0;
fi1=atan2(Ya1,Xa1);
fi2=atan2(Yb1,(a1+Xb1));
Dfi=fi1 - fi2;
L11=sqrt(Xa1^2+Ya1^2);
L12=sqrt((a1+Xb1)^2+Yb1^2);
LAlmax=sqrt(L11^2+L12^2+2*L11*L12);
LAlmin=sqrt(L11^2+L12^2-2*L11*L12);
cursol=(LAlmax-LAlmin);
LA1=LAlmin+cursol/2;

```

```

%Atuador 2:

global L4 L5 Dalf LA2

Xa2=-0.4;
Ya2=0;
Xb2=-0.313;
Yb2=0;
alf1=atan2(Ya2,Xa2);
alf2=atan2(Yb2,(a2+Xb2));
Dalf=alf1 - alf2;
L4=sqrt(Xa2^2+Ya2^2);
L5=sqrt((a2+Xb2)^2+Yb2^2);
LA2max=sqrt(L4^2+L5^2+2*L4*L5);
LA2min=sqrt(L4^2+L5^2-2*L4*L5);
curso2=(LA2max-LA2min);
LA2=LA2min+curso2/2;

%Parâmetros Hidráulicos dos Atuadores:

global M B Kd Kp1 Kp2 Kd1 Kd2 lamd A1 A2 Cin

M=2.00;           %massa total
I12=(m12+M)*l2^2; %momento de inércia do elo 2
B=316;           %coeficiente de amortecimento viscoso
A2=9.4248e-4;    %área da seção transversal da câmara 2 do cilindro
A1=0.0013;       %área da seção transversal da câmara 1 do cilindro
beta=1e9;        %módulo de elasticidade do fluido hidráulico
Ps=1e7;          %pressão de suprimento
Pr=1e5;          %pressão de retorno
k1=6.5218e-8; k2 = 3.2609e-8 %constantes hidráulicas do sistema
Kd1=15;          %constante positiva do subsistema mecânico 1
Kd2=10;          %constante positiva do subsistema mecânico 2
Kp1=50;          %constante positiva do subsistema mecânico 1
Kp2=50;          %constante positiva do subsistema mecânico 2
lambda1=4;       %constante positiva do subsistema mecânico
lambda2=4;       %constante positiva do subsistema mecânico
Vtub1=0.1*A2;    %volume da tubulação entre a válvula e o atuador
Vtub2=Vtub1;    %volume da tubulação entre a válvula e o atuador
Cin=1e-11;       %coeficiente de vazamento

%*****

L1A1=curso1/2;   %posição do pistão na câmara 1 do atuador 1
L2A1=L1A1;       %posição do pistão na câmara 2 do atuador 1
L1A2=curso2/2;   %posição do pistão na câmara 1 do atuador 2
L2A2=L1A2;       %posição do pistão na câmara 2 do atuador 2

%-----

Vh1A1i=L1A1*A1+Vtub1;%volume total de fluido na câmara 1 do atuador 1
Vh1A2i=L1A2*A1+Vtub1;%volume total de fluido na câmara 1 do atuador 2
Vh2A1i=L2A1*A2+Vtub2;%volume total de fluido na câmara 2 do atuador 1
Vh2A2i=L2A2*A2+Vtub2;%volume total de fluido na câmara 2 do atuador 2
%*****

```

```

%*****DADOS DA TRAJETÓRIA DESEJADA*****
%Intervalo de tempo:
to=0;
tf=4;

%Coordenadas Iniciais e Finais da trajetória retilínea:
yo=0.1; yf=0.5;
xo=1.1; xf=1.4;

%Cálculo dos Coeficientes dos Polinômios de Sétima Ordem:
global aox alx a2x a3x a4x a5x a6x a7x
[aox,alx,a2x,a3x,a4x,a5x,a6x,a7x]=setimal(xo,xf,to,tf);
global aoy aly a2y a3y a4y a5y a6y a7y
[aoy,aly,a2y,a3y,a4y,a5y,a6y,a7y]=setimal(yo,yf,to,tf);

%Cálculo da Posição Inicial:
global thetini

Pxo=aox;
Pyo=aoy;

cost2=(Pxo^2 + Pyo^2 -a1^2 -a2^2)/(2*a1*a2);
sent2=-sqrt(1-cost2.^2);
cost1=((a1+a2*cost2)*Pxo+a2*sent2*Pyo)/(Pxo^2+Pyo^2);
sent1=((a1+a2*cost2)*Pyo-a2*sent2*Pxo)/(Pxo^2+Pyo^2);
a=cost2;
b=cost1;
tet2o=atan2(sent2,a);
tet1o=atan2(sent1,b);

thetini=[tet1o tet2o];

%*****FIM*****

```

A partir deste ponto, considera-se o digrama de blocos da figura A.1.

## A.2 Modelo do Robô Hidráulico

O modelo do robô hidráulico segue o equacionamento abordado no capítulo 2. A figura A.2 exhibe o diagrama de blocos deste robô.

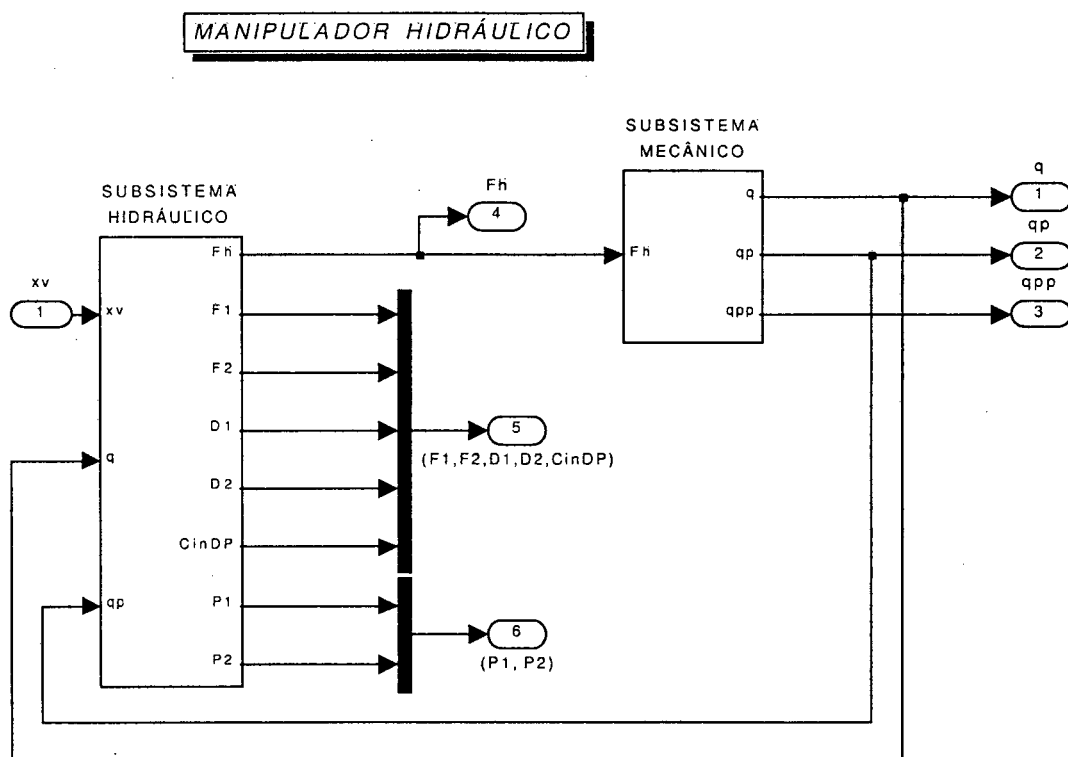


Figura A.2 : Modelo do robô hidráulico

Como pode ser observado na figura acima, este modelo é composto de dois subsistemas, assim como foi observado no capítulo 2. Cada um destes subsistemas é especificado nas subseções seguintes.

### A.2.1 O subsistema mecânico

Neste subsistema, o simulador utiliza a equação (2.16), reescrita em (A .1), para calcular a aceleração das juntas do robô e através de integrações, encontram-se a posições que as mesmas alcançam.

$$H^*(q)\ddot{q} + C^*(q, \dot{q})\dot{q} + D^*(q)\dot{q} + G^*(q) = \bar{J}^T F_h \quad (\text{A .1})$$

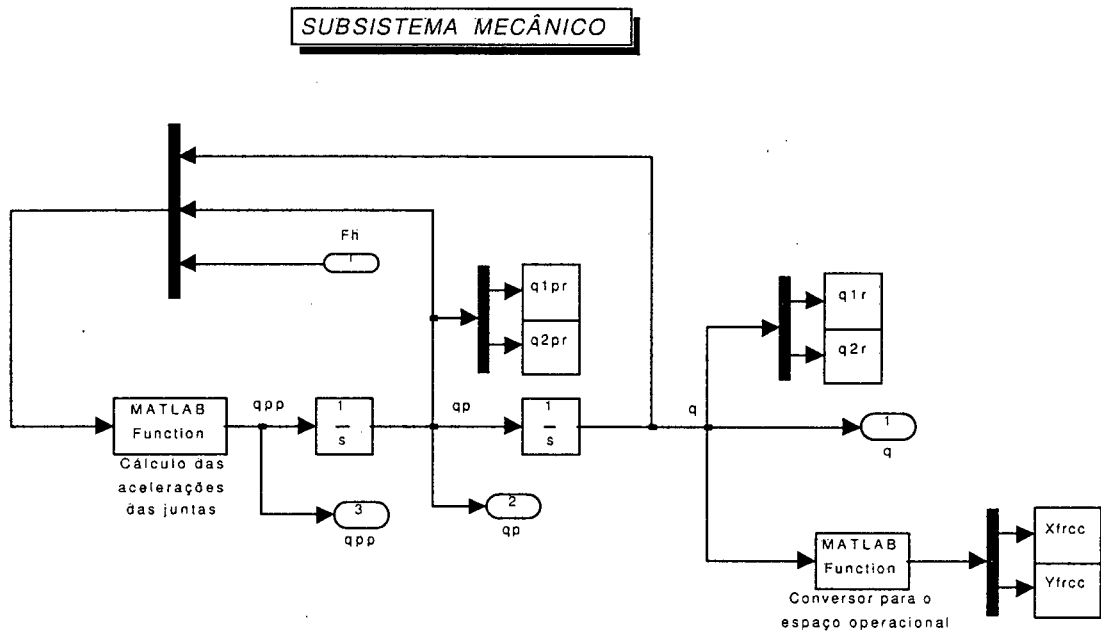


Figura A.3: Subsistema mecânico

Na figura (A.3) pode-se notar o uso de *MATLAB – Functions*. Estes blocos possuem funções que são utilizadas para as suas respectivas entradas. Estas funções calculam a equação matricial (A.1) e no intuito de observar como o efetuator final se comporta, realiza-se a conversão do espaço das juntas para espaço da tarefa, ou operacional.

A seguir, é ilustrado como são implementadas estas funções para estes casos específicos.

*%Função que calcula as acelerações das juntas:*

```
function [Qpp]=Mani2(u)
```

*%Entradas:*

```
q1=u(1); %posição da junta 1
q2=u(2); %posição da junta 2
qp1=u(3); %velocidade da junta 1
qp2=u(4); %velocidade da junta 2
Fh1=u(5); %força hidráulica do atuador 1
Fh2=u(6); %força hidráulica do atuador 2
```

*%\*\*\*\*\*DADOS DA ESTRUTURA MANIPULADORA\*\*\*\*\**

```
global a1 a2 g l1 l2 m11 m12 I11 I12 M B %definidas como variáveis globais
```

*%\*\*\*\*\*Componentes da Matriz de Inércia\*\*\*\*\*:*

```
b11= I11 + m11*l1^2 + I12 + m12*(a1^2 + l2^2 + 2*a1*l2.*cos(q2));
```

```
b12= I12 + m12*(l2^2 + a1*l2.*cos(q2));
```

```
b21=b12;
```

```
b22= I12 + m12*l2^2;
```

*%Matriz de Inércia:*

```
Ine=[b11 b12; b21 b22];
```

*%\*\*\*\*\*Componentes da Matriz de Coriolis\*\*\*\*\*:*

```
h=-m12*a1*l2.*sin(q2);
```

```
c11=h.*qp2;
```

```
c12=h.*(qp1 + qp2);
```

```
c21=-h.*qp1;
```

```
c22=0;
```

*%Matriz dos Momentos Centrífugos e de Coriolis:*

```
Cq=[c11 c12; c21 c22];
```

*%\*\*\*\*\*Componentes da Matriz Gravitacional\*\*\*\*\*:*

```
g1=(m11*l1 + m12*a1)*g.*cos(q1) + m12*l2*g.*cos(q1+q2);
```

```
g2=m12*l2*g.*cos(q1+q2);
```

*%Matriz Gravitacional:*

```
Ga=[g1;g2];
```

*%\*\*\*\*\*DADOS DOS ATUADORES ASSIMÉTRICOS\*\*\*\*\**

```
global L11 L12 Dfi L4 L5 DalF
```

```

%Matriz de transmissão do espaço dos atuadores para o espaço das juntas:
J=[L11*L12*sin(q1-Dfi)/sqrt(L11^2 + L12^2 -2*L11*L12*cos(q1-Dfi)) 0;
  0 L4*L5*sin(q2-Dalf)/sqrt(L4^2 + L5^2 -2*L4*L5*cos(q2-Dalf))];

%Derivada da matriz de transmissão:
Jp=[L11*L12*qp1*((L11^2+L12^2)*cos(q1-Dfi) -2*L11*L12)/(L11^2 + L12^2 -
2*L11*L12*cos(q1-Dfi))^(3/2) 0;
  0 L4*L5*qp2*((L4^2+L5^2)*cos(q2-Dalf) -2*L4*L5)/(L4^2 + L5^2 -
2*L4*L5*cos(q2-Dalf))^(3/2)];

%Matriz diagonal das massas dos atuadores:
Ma=M*eye(2,2);

%Matriz diagonal dos amortecimentos viscosos dos atuadores:
Bv=B*eye(2,2);

%Vetor das forças hidráulicas aplicadas pelos atuadores:
Fh=[Fh1; Fh2];

%Vetor das forças gravitacionais dos atuadores:
cospsi1=(L12*sin(fi2+q1)-L11*sin(fi2))/(sqrt(L11^2 + L12^2-
2*L11*L12*cos(q1-Dfi)));
cospsi2=(L5*sin(alf2+q2)-L4*sin(alf1))/(sqrt(L4^2 + L5^2-2*L4*L5*cos(q2-
Dalf)));

Pat=[g*M*cospsi1; g*M*cospsi2];

%*****CÁLCULO DAS ACELERAÇÕES DAS JUNTAS*****:
%Vetor das velocidades:
coll=[qp1; qp2];

%Cálculo das acelerações das Juntas:
Opp=inv(Ine+J*Ma*J)*( J*Fh - ( Cq + J*Ma*Jp + J*Bv*J)*coll - (Ga +J*Pat));

%*****FIM*****

```



```

%Função que converte os dados reais da trajetória do espaço das
%juntas para o espaço operacional.

function [Efre]=Efetreal(u)

%Entradas:

qr1=u(1);
qr2=u(2);

global a1 a2

Xfr=a1*cos(qr1)+a2*cos(qr1+qr2);
Yfr=a1*sin(qr1)+a2*sin(qr1+qr2);

%Posição no espaço operacional:

Efre=[Xfr; Yfr];

%*****FIM*****

```

## A.2.2 O subsistema hidráulico

O subsistema hidráulico é descrito na equação (A.2)

$$\dot{F}_h = [A_1 E_1(q, p_1, \text{sign}(x_v)) + A_2 E_2(q, p_2, \text{sign}(x_v))] x_v - [A_1 F_1(q) + A_2 F_2(q)] \dot{q} - [A_1 D_1(q) + A_2 D_2(q)] C_{in} p_{\Delta} \quad (\text{A.2})$$

O diagrama de blocos deste subsistema (ver figura A.4) ilustra que os atuadores foram tratados separadamente. Para trabalhos futuros, será desenvolvido um diagrama mais compacto.

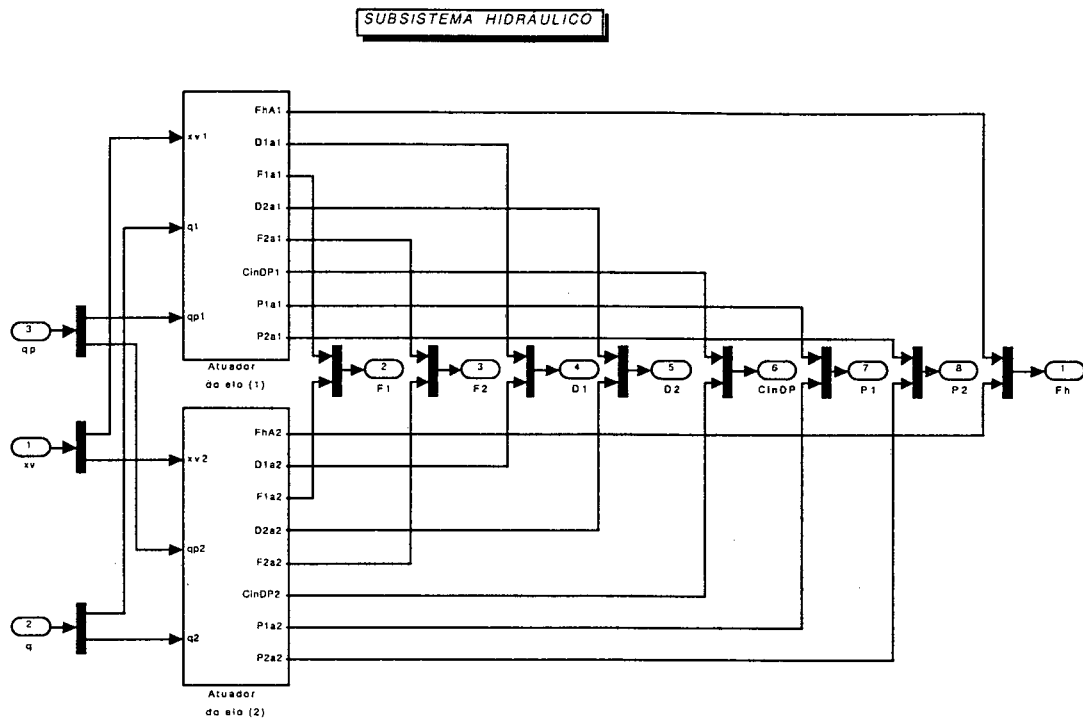


Figura A.4: Diagrama de blocos do subsistema hidráulico

Nota-se no diagrama acima a ausência dos termos  $E_1(.)$  e  $E_2(.)$  da equação A.2. A justificativa foi apresentada no capítulo 3, no intuito de evitar o loop algébrico. O cálculo destes termos é efetuado no controlador em cascata, como será especificado na seção A.4.

Cada um destes atuadores possui a mesma topologia de diagramas. Portanto, esta parte do apêndice limitar-se-á ao atuador do elo 1.

A figura A.5 exibe como é organizado subsistema hidráulico do atuador 1, enquanto a figura A.6 mostra o cálculo da variação da pressão na câmara 1 (ver equação A.3) daquele atuador. A mesma configuração da figura A.6 aplica-se ao cálculo da variação da pressão na câmara 2 do atuador.

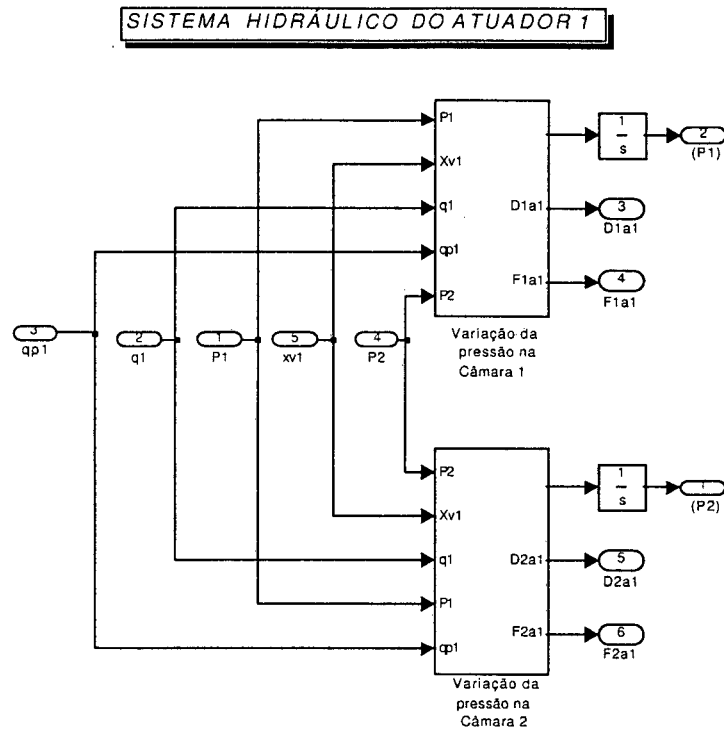


Figura A.5: Organização do subsistema hidráulico do atuador 1.

$$\dot{p}_1 = \frac{\beta}{V_{h1} + A_1 y} [k g_1(p_1, \text{sign}(x_v)) x_v - A_1 \dot{y} - C_{in} p_\Delta] \quad (\text{A.3})$$

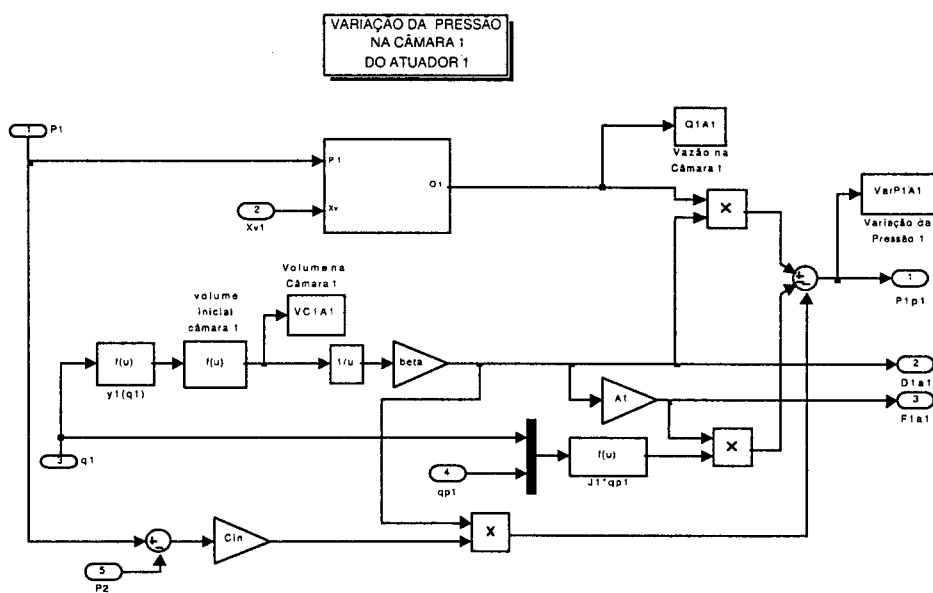


Figura A.6: Variação da pressão na câmara 1 do atuador 1.

Verifica-se na figura (A.6) o uso de três funções:  $y_1(q_1)$ , volume inicial da câmara 1 e  $J_1 \cdot \dot{q}_1$ .

A primeira converte o sinal de deslocamento rotacional da junta 1 ( $u = q_1$ ), em sinal de deslocamento linear do cilindro do atuador 1 ( $y_1$ ), através da equação (2.4), reescrita em (A.5), para este caso.

$$y_1 = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos(u - \Delta\varphi_1)} - L_{A1} \quad (\text{A.5})$$

onde,  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $\Delta\varphi_1$  e  $L_{A1}$  são parâmetros geométricos, gerados na rotina de inicialização.

A segunda (ver equação A.6), como sua própria denominação diz, calcula o volume inicial da câmara 1 ( $V_{hi}$ ), em função da posição inicial do cilindro do atuador 1 ( $L_{li}$ ), calculado em (A.4).

$$V_{hi} = A_1 L_{li} + V_{iub} \quad (\text{A.6})$$

A terceira, converte a velocidade da junta 1 ( $\dot{q}_1$ ) em velocidade do atuador 1, através da equação (A.7).

$$\dot{y}_1 = \frac{L_1 L_2 \sin(q_1 - \Delta\varphi_1)}{\sqrt{L_1^2 + L_2^2 - 2L_1 L_2 \cos(q_1 - \Delta\varphi_1)}} \cdot \dot{q}_1 \quad (\text{A.7})$$

Além destas funções, a figura (A.6), exibe um bloco responsável pelo cálculo da vazão na câmara 1 do atuador 1 (ver equações A.8 e A.9). O diagrama de blocos para este cálculo é mostrado na figura (A.7).

$$Q_1 = k_1 g_1(p_1, \text{sign}(x_v)) x_v, \quad (\text{A.8})$$

$$g_1(p_1, \text{sign}(x_v)) = \begin{cases} \sqrt{|p_S - p_L|}, & x_v \geq 0 \\ \sqrt{|p_L - p_R|}, & x_v < 0 \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

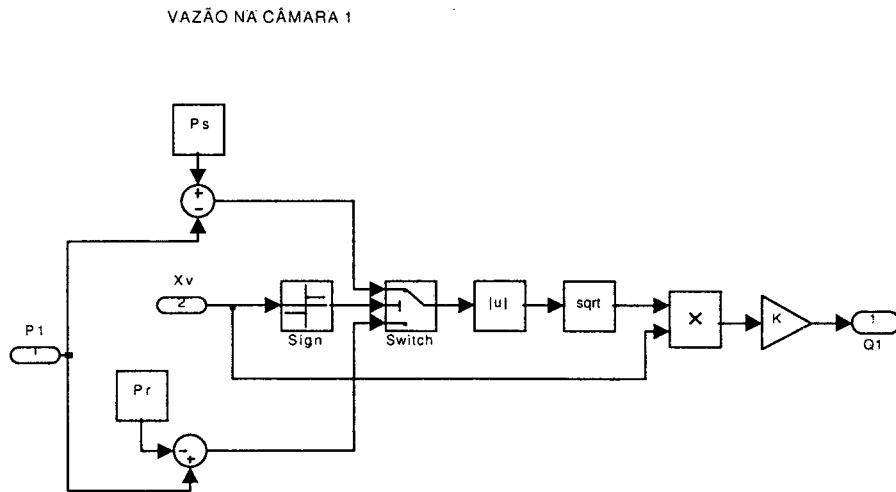


Figura A.7: Vazão na câmara 1.

Após a implementação destes dados, para ambas as câmaras, calcula-se a força hidráulica deste atuador (ver figura A.8).

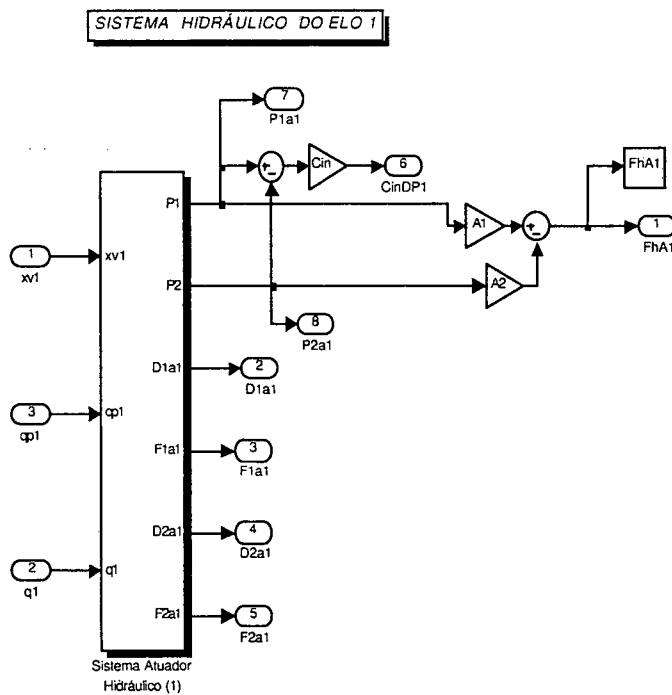


Figura A.8: Cálculo da força hidráulica.

Após esta etapa, o programa reassume a topologia apresentada na figura A.4, ou seja, o digrama da figura acima, está no interior do bloco denominado: Atuador do elo(1), localizado na figura A.4.

Destaca-se novamente que os mesmos procedimentos são realizados para o atuador 2.

### A.3 Gerador de trajetórias

Al figura A.9, baseada em Craig(1986), ilustra o mapeamento entre as descrições cinemáticas desenvolvidas nesta dissertação.

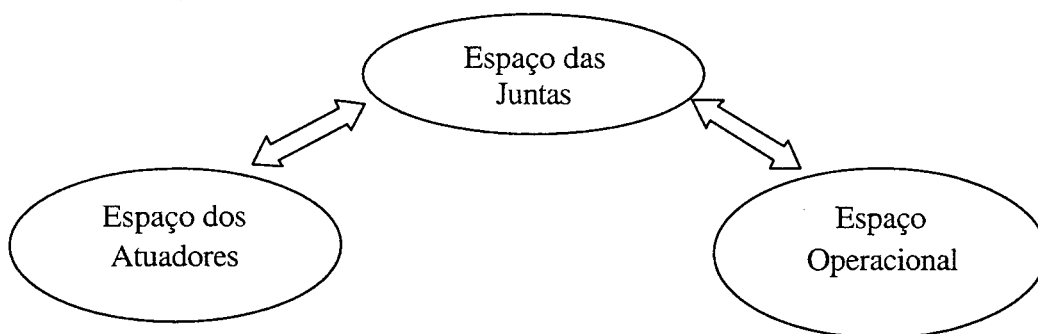


Figura A.9: Mapeamento cinemático de um robô.

O gerador de trajetórias, exibido na figura A.10, segue a mesma fundamentação. Ou seja, ele gera dados desejados para os espaços da tarefa, das juntas e dos atuadores.

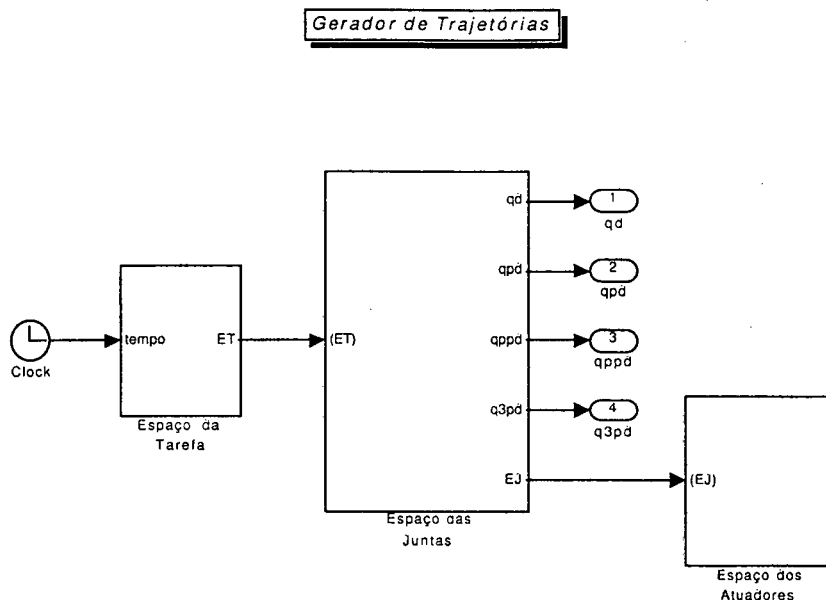


Figura A.10 : Gerador de trajetórias.

Nota-se na figura A.10 a seqüência de geração destes espaços. Primeiramente o espaço da tarefa, utilizando o tempo como entrada. A diagrama de blocos e a função utilizada para este cálculo são mostrados na seqüência.

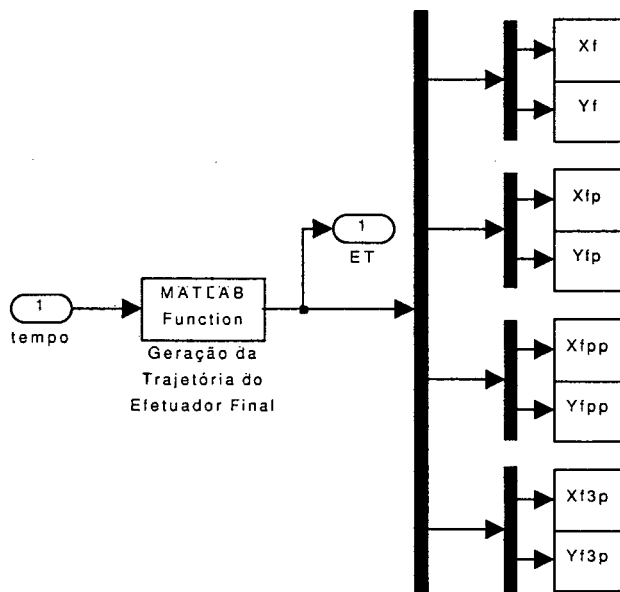


Figura A.11: Diagrama de blocos para geração do espaço da tarefa.

```

%Função que calcula a cinemática do efetuator final on-line.
function [Cart]=cartesiano(u)

t=u;

%Polinômios Equivalentes:
global aox alx a2x a3x a4x a5x a6x a7x

Xf = aox + alx*t + a2x*t^2 + a3x*t^3 + a4x*t^4 + a5x*t^5 + a6x*t^6 +
a7x*t^7;

Xfp = alx + 2*a2x*t + 3*a3x*t^2 + 4*a4x*t^3 + 5*a5x*t^4 + 6*a6x*t^5 +
7*a7x*t^6;

Xfpp = 2*a2x + 6*a3x*t + 12*a4x*t^2 + 20*a5x*t^3 + 30*a6x*t^4 + 42*a7x*t^5;

Xf3p = 6*a3x + 24*a4x*t + 60*a5x*t^2 + 120*a6x*t^3 + 210*a7x*t^4;

global aoy aly a2y a3y a4y a5y a6y a7y

Yf = aoy + aly*t + a2y*t^2 + a3y*t^3 + a4y*t^4 + a5y*t^5 + a6y*t^6 +
a7y*t^7;

Yfp = aly + 2*a2y*t + 3*a3y*t^2 + 4*a4y*t^3 + 5*a5y*t^4 + 6*a6y*t^5 +
7*a7y*t^6;

Yfpp = 2*a2y + 6*a3y*t + 12*a4y*t^2 + 20*a5y*t^3 + 30*a6y*t^4 + 42*a7y*t^5;

Yf3p = 6*a3y + 24*a4y*t + 60*a5y*t^2 + 120*a6y*t^3 + 210*a7y*t^4;

Cart=[Xf Yf Xfp Yfp Xfpp Yfpp Xf3p Yf3p];

%*****FIM*****

```

Como relatado no capítulo 4, gera-se o espaço das juntas utilizando a cinemática inversa. O diagrama de blocos associado (ver figura A.12) e as funções envolvidas são destacados. Observa-se que nesta etapa a entrada da função é o espaço da tarefa.



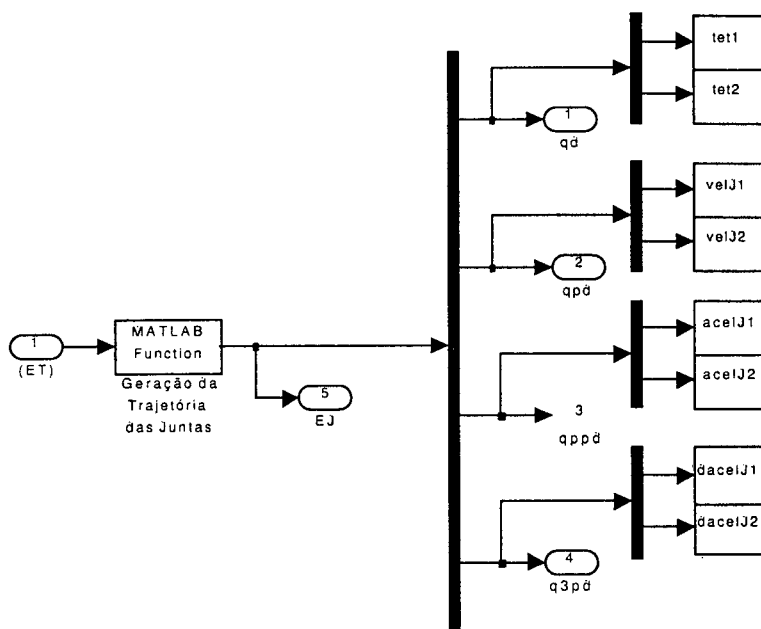


Figura A.12: Geração do espaço das juntas.

*%Função que calcula a trajetória da junta:*

```
function [tet1,tet2]=Tjunta(Pxo,Pyo,a1,a2)
```

```
Pxo=Pxo;
```

```
Pyo=Pyo;
```

```
cost2=(Pxo.^2 + Pyo.^2 -a1^2 -a2^2)/(2*a1*a2);
```

```
sent2=-sqrt(1-cost2.^2);
```

```
cost1=((a1+a2*cost2).*Pxo+a2*sent2.*Pyo)./(Pxo.^2+Pyo.^2);
```

```
sent1=((a1+a2*cost2).*Pyo-a2*sent2.*Pxo)./(Pxo.^2+Pyo.^2);
```

```
a=cost2;
```

```
b=cost1;
```

```
tet2=atan2(sent2,a);
```

```
tet1=atan2(sent1,b);
```

```
%*****FIM*****
```

*%Função que calcula a velocidade e a aceleração das juntas apartir dos dados cinemáticos do efetuador final:*

```
function
[velJ1,velJ2,acelJ1,acelJ2,dacelJ1,dacelJ2]=efetvel(Xfp,Yfp,Xfpp,Yfpp,Xf3p,...
    Yf3p,tet1,tet2,a1,a2)

%onde:
%Xfp - velocidade da componente x do efetuador final;
%Yfp - velocidade da componente y do efetuador final;
%Xfpp - aceleração da componente x do efetuador final;
%Yfpp - aceleração da componente y do efetuador final;
%Xf3p - Derivada da aceleração da componente x do efetuador final;
%Yf3p - Derivada da aceleração da componente y do efetuador final;
%velJ1 - velocidade na junta1;
%velJ2 - velocidade na junta2;
%acelJ1 - aceleração na junta1;
%acelJ2 - aceleração na junta2;
%J - Matriz Inversa do Jacobiano Geométrico;
%Jp - Derivada de J;
%Jpp - Segunda derivada de J;

%Velocidade:

    J(:,:)= [cos(tet1+tet2)/a1/sin(tet2) sin(tet1+tet2)/a1/sin(tet2);
              (-a2*cos(tet1+tet2)-a1*cos(tet1))/a2/a1/sin(tet2) (-
a2*sin(tet1+tet2)-a1*sin(tet1))/a2/a1/sin(tet2)];

    coluna=[Xfp; Yfp];

    pp=J(:,:)*coluna;

%Aceleração:

Jp(:,:)= [-sin(tet1+tet2)*(pp(1)+pp(2))/a1/sin(tet2)-
pp(2)*cos(tet1+tet2)/a1/sin(tet2)^2*cos(tet2)
cos(tet1+tet2)*(pp(1)+pp(2))/a1/sin(tet2)-
pp(2)*sin(tet1+tet2)/a1/sin(tet2)^2*cos(tet2)];

    a2*sin(tet1+tet2)*(pp(1)+pp(2))+pp(1)*sin(tet1)/a2/sin(tet2)+pp(2)*cos(tet1)
/a2/sin(tet2)^2*cos(tet2) -a2*cos(tet1+tet2)*(pp(1)+pp(2))-
pp(1)*cos(tet1)/a2/sin(tet2)+pp(2)*sin(tet1)/a2/sin(tet2)^2*cos(tet2)];

    col=[Xfpp; Yfpp];
    p3=Jp(:,:)*coluna + J(:,:)*col;
```

```
%Derivada da Aceleração:
```

```
Jpp(:, :)=[-  
cos(tet1+tet2)*(pp(1)+pp(2))^2/a1/sin(tet2)+2*pp(2)*(p3(1)+p3(2))*sin(tet1+tet  
2)/a1/sin(tet2)^2*cos(tet2)+2*pp(2)^2*cos(tet1+tet2)/a1/sin(tet2)^3*cos(tet2)^  
2+pp(2)^2*cos(tet1+tet2)/a1/sin(tet2)-  
sin(tet1+tet2)*(p3(1)+p3(2))/a1/sin(tet2)-  
p3(2)*cos(tet1+tet2)/a1/sin(tet2)^2*cos(tet2) -  
sin(tet1+tet2)*(pp(1)+pp(2))^2/a1/sin(tet2)-  
2*pp(2)*(p3(1)+p3(2))*cos(tet1+tet2)/a1/sin(tet2)^2*cos(tet2)+2*pp(2)^2*sin(te  
t1+tet2)/a1/sin(tet2)^3*cos(tet2)^2+pp(2)^2*sin(tet1+tet2)/a1/sin(tet2)+cos(te  
t1+tet2)*(p3(1)+p3(2))/a1/sin(tet2)-  
p3(2)*sin(tet1+tet2)/a1/sin(tet2)^2*cos(tet2);  
a2*cos(tet1+tet2)*(pp(1)+pp(2))^2+pp(1)^2*cos(tet1)/a2/sin(tet2)-  
2*pp(1)*pp(2)*sin(tet1)/a2/sin(tet2)^2*cos(tet2)-  
2*pp(2)^2*cos(tet1)/a2/sin(tet2)^3*cos(tet2)^2-  
pp(2)^2*cos(tet1)/a2/sin(tet2)+a2*sin(tet1+tet2)*(p3(1)+p3(2))+p3(1)*sin(tet1)  
/a2/sin(tet2)+p3(2)*cos(tet1)/a2/sin(tet2)^2*cos(tet2)  
a2*sin(tet1+tet2)*(pp(1)+pp(2))^2+pp(1)^2*sin(tet1)/a2/sin(tet2)+2*pp(1)*pp(2)  
*cos(tet1)/a2/sin(tet2)^2*cos(tet2)-  
2*pp(2)^2*sin(tet1)/a2/sin(tet2)^3*cos(tet2)^2-pp(2)^2*sin(tet1)/a2/sin(tet2)-  
a2*cos(tet1+tet2)*(p3(1)+p3(2))-  
p3(1)*cos(tet1)/a2/sin(tet2)+p3(2)*sin(tet1)/a2/sin(tet2)^2*cos(tet2)];
```

```
colun=[Xf3p; Yf3p];
```

```
dp3=J(:, :)*colun + 2*Jp(:, :)*col + Jpp(:, :)*coluna;
```

```
%Obtenção da velocidade, aceleração e derivada da aceleração :
```

```
velJ1=pp(1); velJ2=pp(2);
```

```
acelJ1=p3(1); acelJ2=p3(2);
```

```
dacelJ1=dp3(1); dacelJ2=dp3(2);
```

```
%*****FIM*****
```

```
%Função que calcula a cinemática inversa on-line.
```

```
function [TH]=gertra(u)
```

```
%Entrada dos dados do espaço operacional:
```

```
Xf=u(1);
```

```
Yf=u(2);
```

```
Xfp=u(3);
```

```
Yfp=u(4);
```

```
Xfpp=u(5);
```

```
Yfpp=u(6);
```

```
Xf3p=u(7);
```

```
Yf3p=u(8);
```

```

%Cálculo da Cinemática Inversa:
global a1 a2
%Função que calcula as posições das juntas:
[tet1,tet2]=Tjunta(Xf,Yf,a1,a2);
%Função que calcula as velocidades, acelerações e jerk's das juntas:
[velJ1,velJ2,acelJ1,acelJ2,dacelJ1,dacelJ2]=efetvel(Xfp,Yfp,Xfpp,Yfpp,Xf3p,
    Yf3p,tet1,tet2,a1,a2);
Theta=[tet1 tet2];           %Matriz de dados para o SIMULINK
Thetap=[velJ1 velJ2];       %Matriz de dados para o SIMULINK
Thetapp=[acelJ1 acelJ2];    %Matriz de dados para o SIMULINK
Theta3p=[dacelJ1 dacelJ2];  %Matriz de dados para o SIMULINK
TH=[Theta Thetap Thetapp Theta3p]; %Matriz de saída
%*****FIM*****

```

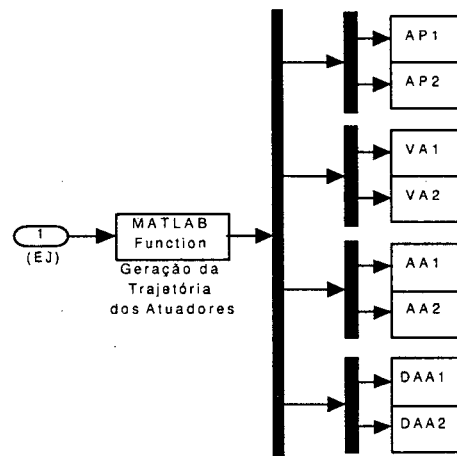


Figura A.13: Geração do espaço dos atuadores.

```

%Função que calcula as trajetórias desejadas dos atuadores:

function [Act]=espatuador(u)

tet1=u(1);
tet2=u(2);
velJ1=u(3);
velJ2=u(4);
acelJ1=u(5);
acelJ2=u(6);
daccelJ1=u(7);
daccelJ2=u(8);

%Posição dos Atuadores:

global L11 L12 Dfi LA1 L4 L5 Dalf LA2

AP1 = sqrt(L11^2+L12^2-2*L11*L12*cos(tet1-Dfi))-LA1;
AP2 = sqrt(L4^2+L5^2-2*L4*L5*cos(tet2-Dalf))-LA2;

AP=[AP1 AP2];

%Velocidade dos Atuadores:

Jdui(:,:)= [ L11*L12*sin(tet1-Dfi)/sqrt(L11^2 + L12^2 -2*L11*L12*cos(tet1-
Dfi)) 0;
              0 L4*L5*sin(tet2-Dalf)/sqrt(L4^2 + L5^2 -
2*L4*L5*cos(tet2-Dalf))];

coluna=[velJ1; velJ2];

VA=[Jdui(:,:)]*coluna;
VA=VA';

%Aceleracao dos Atuadores:

Jddi(:,:)= [L11*L12*velJ1*(cos(-tet1+Dfi)*L11^2+cos(-tet1+Dfi)*L12^2-
L11*L12*cos(-tet1+Dfi)^2-L11*L12)/(L11^2+L12^2-2*L11*L12*cos(-
tet1+Dfi))^(3/2) 0;
              0 L4*L5*velJ2*(cos(-tet2+Dalf)*L4^2+cos(-
tet2+Dalf)*L5^2-L4*L5*cos(-tet2+Dalf)^2-L4*L5)/(L4^2+L5^2-2*L4*L5*cos(-
tet2+Dalf))^(3/2)];

col=[acelJ1; accelJ2];

AA=[Jddi(:,:)]*coluna + [Jdui(:,:)]*col;
AA=AA';

```

```

%Derivada da Aceleracao dos Atuadores:

J3di(:, :)=[(acelJ1*Ll1*Ll2*(acelJ1*sin(-tet1+Dfi)*Ll1^2+acelJ1*sin(-
tet1+Dfi)*Ll2^2-2*acelJ1*Ll1*Ll2*cos(-tet1+Dfi)*sin(-tet1+Dfi))/(Ll1^2+Ll2^2-
2*Ll1*Ll2*cos(-tet1+Dfi))^(3/2)+3*velJ1^2*Ll1^2*Ll2^2*sin(-tet1+Dfi)*(cos(-
tet1+Dfi)*Ll1^2+cos(-tet1+Dfi)*Ll2^2-Ll1*Ll2*cos(-tet1+Dfi))^2-
Ll1*Ll2)/(Ll1^2+Ll2^2-2*Ll1*Ll2*cos(-tet1+Dfi))^(5/2)+acelJ1*Ll1*Ll2*(cos(-
tet1+Dfi)*Ll1^2+cos(-tet1+Dfi)*Ll2^2-Ll1*Ll2*cos(-tet1+Dfi))^2-
Ll1*Ll2)/(Ll1^2+Ll2^2-2*Ll1*Ll2*cos(-tet1+Dfi))^(3/2) 0;
0 (acelJ2*L4*L5*(acelJ2*sin(-tet2+DalF)*L4^2+acelJ2*sin(-tet2+DalF)*L5^2-
2*acelJ2*L4*L5*cos(-tet2+DalF)*sin(-tet2+DalF))/(L4^2+L5^2-2*L4*L5*cos(-
tet2+DalF))^(3/2)+3*velJ2^2*L4^2*L5^2*sin(-tet2+DalF)*(cos(-
tet2+DalF)*L4^2+cos(-tet2+DalF)*L5^2-L4*L5*cos(-tet2+DalF))^2-
L4*L5)/(L4^2+L5^2-2*L4*L5*cos(-tet2+DalF))^(5/2)+acelJ2*L4*L5*(cos(-
tet2+DalF)*L4^2+cos(-tet2+DalF)*L5^2-L4*L5*cos(-tet2+DalF))^2-
L4*L5)/(L4^2+L5^2-2*L4*L5*cos(-tet2+DalF))^(3/2)];

colun=[dacelJ1; dacelJ2];

DAA=[Jdui(:, :)]*colun + 2*[Jddi(:, :)]*col + [J3di(:, :)]*coluna;

DAA=DAA';

%Saída:

Act=[AP VA AA DAA];

%*****FIM*****

```

## A.4 O controlador em cascata

Nesta última seção são ilustrados os diagramas de blocos e as funções envolvidas na obtenção do controlador em cascata. A figura (A.15) exhibe as leis de controle que compreendem esta estratégia de controle. As equações envolvidas serão reescritas.

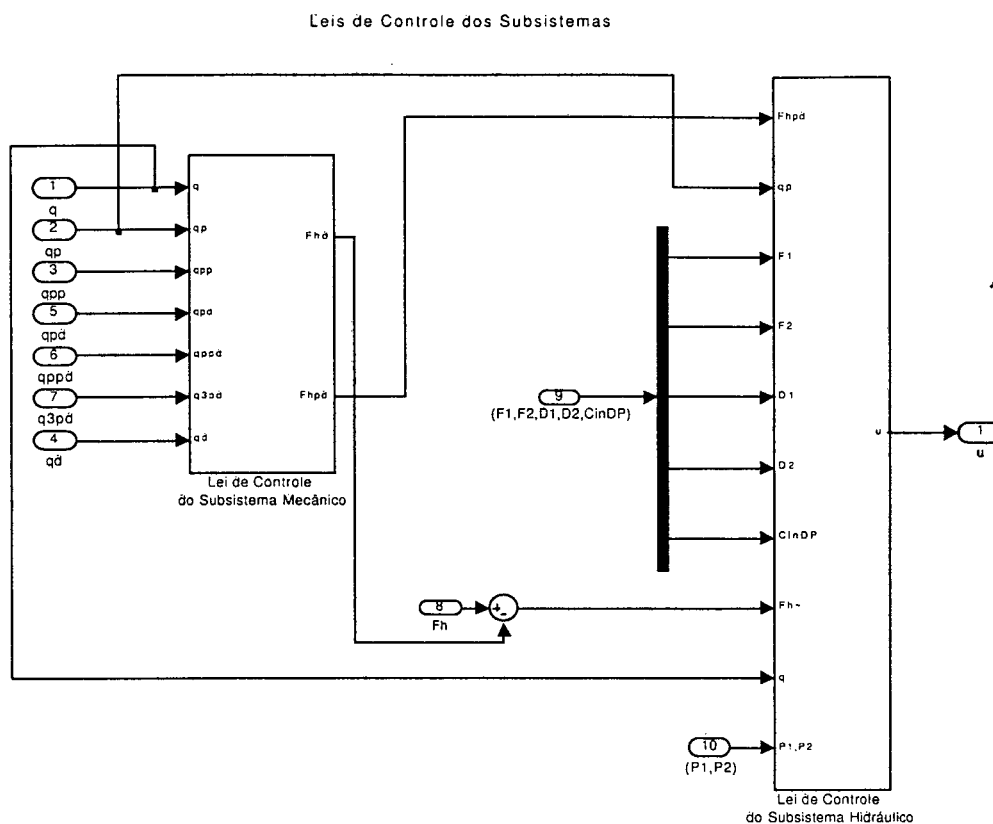


Figura A.14: Constituição do controlador em cascata.

Considerando a figura A.14, observam-se as leis de controle do subsistema hidráulico e do subsistema mecânico. As exposições destas leis serão realizadas a partir do diagrama de blocos mais interno até o alcance da topologia da figura acima.

#### A.4.1 Lei de controle do subsistema mecânico.

A implementação da lei de controle deste subsistema inicia-se com a obtenção dos valores de dos erros de trajetória (ver figura A.15).

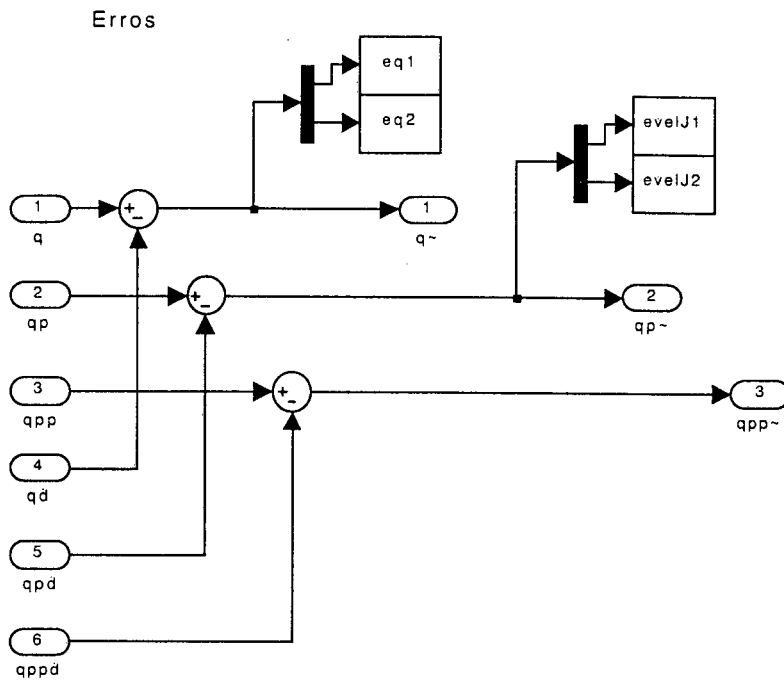


Figura A.15: Erros de trajetórias.

Com a obtenção destes erros, são calculados os valores de referência, os erros de seguimento de trajetória e sua primeira derivada. Estes termos podem ser observados nos diagramas da figura A.16.

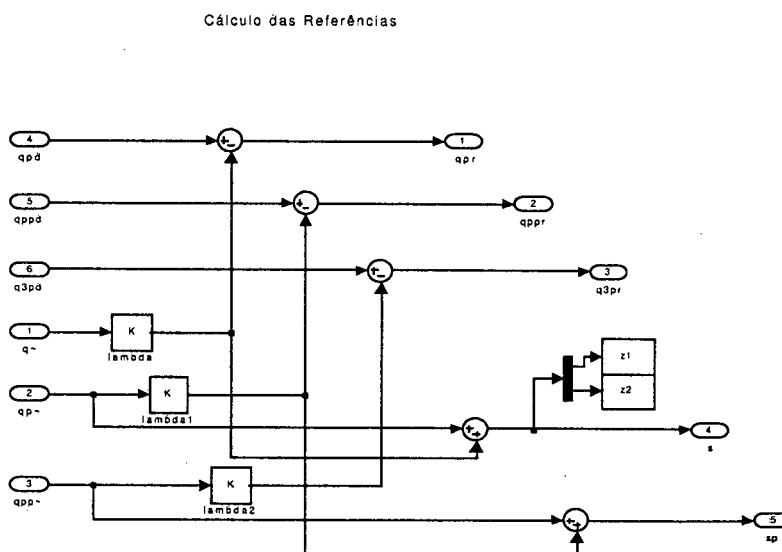


Figura A.16: Diagrama para o cálculo das referências e erros de seguimento.



Os dados calculados até esta fase são utilizados para o cálculo da força desejada (ver equação A.10) e de sua primeira derivada (ver equação A.11). A primeira, é a lei de controle do subsistema mecânico, enquanto a segunda é posteriormente utilizada para o cálculo da lei de controle do subsistema hidráulico.

$$F_{hd} = (\bar{J}_n^T)^{-1} (H_n^*(q)\ddot{q}_r + C_n^*(q, \dot{q})\dot{q}_r + D_n^*(q)\dot{q}_r + G_n^*(q) - K_D s) \quad (\text{A.10})$$

$$\begin{aligned} \dot{F}_{hd} = & \frac{d(\bar{J}_n^T)^{-1}}{dt} (H_n^*(q)\ddot{q}_r + C_n^*(q, \dot{q})\dot{q}_r + D_n^*(q)\dot{q}_r + G_n^*(q) - K_D s) + \\ & (\bar{J}_n^T)^{-1} (H_n^*(q)\ddot{q}_r + \dot{H}_n^*(q)\ddot{q}_r + C_n^*(q, \dot{q})\ddot{q}_r + \dot{C}_n^*(q, \dot{q})\dot{q}_r + \dot{D}_n^*(q)\dot{q}_r) + \\ & (\bar{J}_n^T)^{-1} (D_n^*(q)\dot{q}_r + \dot{G}_n^*(q) - K_D \dot{s}) \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Na seqüência, são expostos o diagrama *Simulink* e suas respectivas *MATLAB – Functions*, que realizam o referidos cálculos.

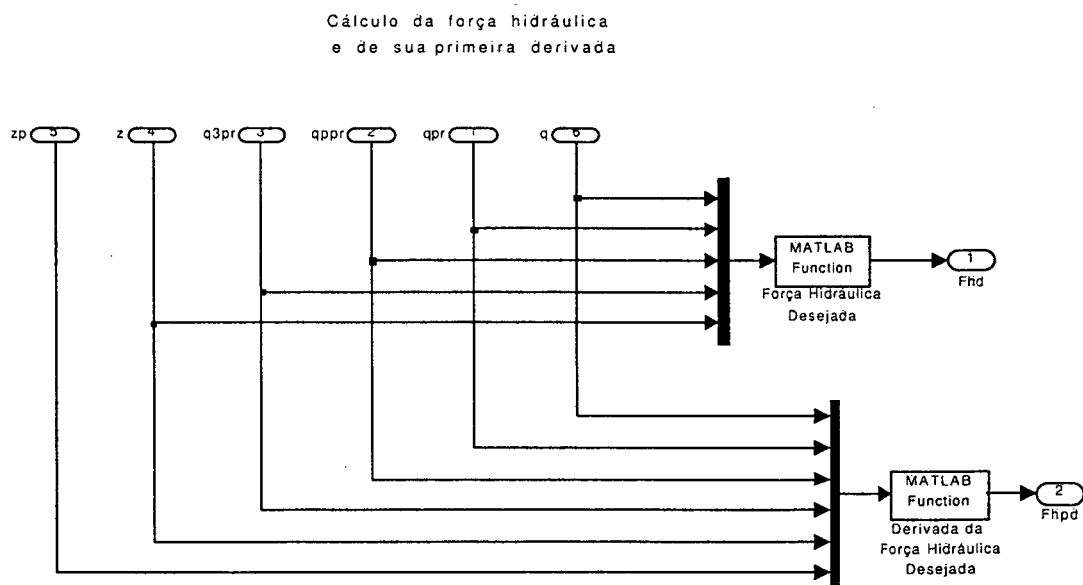


Figura A.17: Diagrama para o cálculo da força hidráulica e de sua 1ª derivada.

*%Função que calcula a força hidráulica desejada para o subsistema mecânico*

```
function [Fhd]=Fhides(u)
```

```
%Entradas:
```

```
q1=u(1);
q2=u(2);
qpr1=u(3);
qpr2=u(4);
qp1r1=u(5);
qp1r2=u(6);
q3pr1=u(7);
q3pr2=u(8);
z1=u(9);
z2=u(10);
```

```
%*****DADOS DA ESTRUTURA MANIPULADORA*****
```

```
global a1 a2 g l1 l2 m1 m2 I1 I2 M B Kd1 Kd2
```

```
%*****Componentes da Matriz de Inércia*****:
```

```
b11= I1 + m1*l1^2 + I2 + m2*(a1^2 + l2^2 + 2*a1*l2.*cos(q2));
```

```
b12= I2 + m2*(l2^2 + a1*l2.*cos(q2));
```

```
b21=b12;
```

```
b22= I2 + m2*l2^2;
```

```
%Matriz de Inércia:
```

```
Ine=[b11 b12; b21 b22];
```

```
%*****Componentes da Matriz de Coriolis*****:
```

```
h=-m2*a1*l2.*sin(q2);
```

```
c11=h.*qpr2;
```

```
c12=h.*(qpr1 + qpr2);
```

```
c21=-h.*qpr1;
```

```
c22=0;
```

```
%Matriz dos Momentos Centrífugos e de Coriolis:
```

```
Cq=[c11 c12; c21 c22];
```

```
%*****Componentes da Matriz Gravitacional*****:
```

```
g1=(m1*l1 + m2*a1)*g.*cos(q1) + m2*l2*g.*cos(q1+q2);
```

```
g2=m2*l2*g.*cos(q1+q2);
```

```

%Matriz Graviacional:

Ga=[g1;g2];

%*****DADOS DOS ATUADORES ASSIMÉTRICOS*****

global L11 L12 Dfi L4 L5 Dalf

%Matriz de transmissão do espaço dos atuadores para o espaço das juntas:

J=[L11*L12*sin(q1-Dfi)/sqrt(L11^2 + L12^2 -2*L11*L12*cos(q1-Dfi)) 0;
   0 L4*L5*sin(q2-Dalf)/sqrt(L4^2 + L5^2 -2*L4*L5*cos(q2-Dalf))];

%Derivada da matriz de transmissão:

Jp=[L11*L12*qp1*((L11^2+L12^2)*cos(q1-Dfi) -2*L11*L12)/(L11^2 + L12^2 -
2*L11*L12*cos(q1-Dfi))^(3/2) 0;
    0 L4*L5*qp2*((L4^2+L5^2)*cos(q2-Dalf) -2*L4*L5)/(L4^2 + L5^2 -
2*L4*L5*cos(q2-Dalf))^(3/2)];

%Matriz diagonal das massas dos atuadores:

Ma=M*eye(2,2);

%Matriz diagonal dos amortecimentos viscosos dos atuadores:

Bv=B*eye(2,2);

%Vetor das forças gravitacionais dos atuadores:

cospsi1=(L12*sin(fi2+q1)-L11*sin(fi1))/(sqrt(L11^2 + L12^2-2*L11*L12*cos(q1-
Dfi)));

cospsi2=(L5*sin(alf2+q2)-L4*sin(alf1))/(sqrt(L4^2 + L5^2-2*L4*L5*cos(q2-
Dalf)));

Pat=[g*M*cospsi1; g*M*cospsi2];

%*****CÁLCULO DAS FORÇAS HIDRÁULICAS DESEJADAS*****

%Vetor das velocidades:

col1=[qp1; qp2];

%Vetor das acelerações:

col2=[qpp1; qpp2];

%Vetor do erro de seguimento de trajetória:

z=[Kd1*z1; Kd2*z2];

%Matriz dos ganhos:

Kd=[Kd1 0; 0 Kd2];

```

```
%Força Hidráulica Desejada:
```

```
Fhd= inv(J)*([Ine+J*Ma*J]*col2 + [Cq + J*Ma*Jp + J*Bv*J]*col1 + Ga + J*Pat - [Kd]*z);
```

```
%*****EIM*****
```

```
%Função que calcula a derivada da força hidráulica desejada para o subsistema mecânico
```

```
function [Fhpd]=Fhidesp(u)
```

```
%Entradas:
```

```
q1=u(1);
q2=u(2);
qpr1=u(3);
qpr2=u(4);
qppr1=u(5);
qppr2=u(6);
q3pr1=u(7);
q3pr2=u(8);
z1=u(9);
z2=u(10);
zp1=u(11);
zp2=u(12);
```

```
%*****DADOS DA ESTRUTURA MANIPULADORA*****
```

```
global a1 a2 g l1 l2 m11 m12 I11 I12 M B Kd1 Kd2
```

```
%*****Componentes da Matriz de Inércia*****:
```

```
b11= I11 + m11*l1^2 + I12 + m12*(a1^2 + l2^2 + 2*a1*l2.*cos(q2));
```

```
b12= I12 + m12*(l2^2 + a1*l2.*cos(q2));
```

```
b21=b12;
```

```
b22= I12 + m12*l2^2;
```

```
%Matriz de Inércia:
```

```
Ine=[b11 b12; b21 b22];
```

```
%*****Derivada da Matriz de Inércia*****:
```

```
%Componentes:
```

```
b11p=-2*m12*a1*l2.*qpr2.*sin(q2);
```

```
b12p=-m12*a1*l2.*qpr2.*sin(q2);
```

```
b21p=b12p;
```

```
b22p=0;
```

```

%Derivada da Matriz de Inércia:
Inep=[b11p b12p; b21p b22p];

%*****Componentes da Matriz de Coriolis*****:
h=-m12*a1*l2.*sin(q2);
c11=h.*qpr2;
c12=h.*(qpr1 + qpr2);
c21=-h.*qpr1;
c22=0;

%Matriz dos Momentos Centrífugos e de Coriolis:
Cq=[c11 c12; c21 c22];

%*****Derivada da Matriz de Coriolis*****:
hp=-m12*a1*l2.*qpr2.*cos(q2);
c11p=hp.*qpr2 + h.*qppr2;
c12p=hp.*(qpr1 + qpr2) + h.*(qppr1 + qppr2);
c21p=-(hp*qpr1 + h.*qppr1);
c22p=0;

%Derivada da Matriz dos Momentos Centrífugos e de Coriolis:
Cqp=[c11p c12p; c21p c22p];

%*****Componentes da Matriz Gravitacional*****:
g1=(m11*l1 + m12*a1)*g.*cos(q1) + m12*l2*g.*cos(q1+q2);
g2=m12*l2*g.*cos(q1+q2);

%Matriz Graviacional:
Ga=[g1;g2];

%*****Derivada da Matriz Gravitacional*****:
g1p=-((m11*l1 + m12*a1)*g.*qpr1.*sin(q1) + m12*l2*g.*(qpr1+qpr2).*sin(q1+q2));
g2p=-m12*l2*g.*(qpr1+qpr2).*sin(q1+q2);

%Derivada da Matriz Gravitacional:
Gap=[g1p; g2p];

```

```

%*****DADOS DOS ATUADORES ASSIMÉTRICOS*****

global L11 L12 Dfi L4 L5 Dalf fil fi2 alf1 alf2

%Matriz de transmissão do espaço dos atutores para o espaço das juntas:

J=[L11*L12*sin(q1-Dfi)/sqrt(L11^2 + L12^2 -2*L11*L12*cos(q1-Dfi)) 0;
  0 L4*L5*sin(q2-Dalf)/sqrt(L4^2 + L5^2 -2*L4*L5*cos(q2-Dalf))];

%Derivada da matriz de transmissão:

Jp=[L11*L12*qpr1*((L11^2+L12^2)*cos(q1-Dfi) -2*L11*L12)/(L11^2 + L12^2 -
2*L11*L12*cos(q1-Dfi))^(3/2) 0;
  0 L4*L5*qpr2*((L4^2+L5^2)*cos(q2-Dalf) -2*L4*L5)/(L4^2 + L5^2 -
2*L4*L5*cos(q2-Dalf))^(3/2)];

%Segunda derivada da matriz de transmissão:

Jpp=[(qpr1*L11*L12*(qpr1*sin(-q1+Dfi)*L11^2 + qpr1*sin(-q1+Dfi)*L12^2 -
2*qpr1*L11*L12*cos(-q1+Dfi)*sin(-q1+Dfi))/(L11^2+L12^2 - 2*L11*L12*cos(-
q1+Dfi))^(3/2) + 3*qpr1^2*L11^2*L12^2*(cos(-q1+Dfi)*L11^2 + cos(-q1+Dfi)*L12^2
- L11*L12*cos(-q1+Dfi)^2 - L11*L12)/(L11^2+L12^2 - 2*L11*L12*cos(-
q1+Dfi))^(5/2)*sin(-q1+Dfi) + qpr1*L11*L12*(cos(-q1+Dfi)*L11^2 + cos(-
q1+Dfi)*L12^2 - L11*L12*cos(-q1+Dfi)^2 - L11*L12)/(L11^2+L12^2 -
2*L11*L12*cos(-q1+Dfi))^(3/2) 0;
  0 (qpr2*L4*L5*(qpr2*sin(-q2+Dalf)*L4^2 + qpr2*sin(-q2+Dalf)*L5^2 -
2*qpr2*L4*L5*cos(-q2+Dalf)*sin(-q2+Dalf))/(L4^2+L5^2 - 2*L4*L5*cos(-
q2+Dalf))^(3/2) + 3*qpr2^2*L4^2*L5^2*(cos(-q2+Dalf)*L4^2 + cos(-q2+Dalf)*L5^2 -
L4*L5*cos(-q2+Dalf)^2 - L4*L5)/(L4^2+L5^2 - 2*L4*L5*cos(-q2+Dalf))^(5/2)*sin(-
q2+Dalf) + qpr2*L4*L5*(cos(-q2+Dalf)*L4^2 + cos(-q2+Dalf)*L5^2 - L4*L5*cos(-
q2+Dalf)^2 - L4*L5)/(L4^2 + L5^2 - 2*L4*L5*cos(-q2+Dalf))^(3/2)];

%Derivada da Matriz Inversa de Transmissão:

JIp=[-qpr1/L11/L12/sin(-q1+Dfi)^2*(L11^2+L12^2-2*L11*L12*cos(-
q1+Dfi))^(1/2)*cos(-q1+Dfi) + qpr1/(L11^2+L12^2-2*L11*L12*cos(-q1+Dfi))^(1/2)
0;
  0 -qpr2/L4/L5/sin(-q2+Dalf)^2*(L4^2+L5^2-2*L4*L5*cos(-q2+Dalf))^(1/2)*cos(-
q2+Dalf) + qpr2/(L4^2+L5^2-2*L4*L5*cos(-q2+Dalf))^(1/2)];

%*****VETOR DAS FORÇAS GRAVITACIONAIS DOS ATUADORES*****:

%cossenos dos ângulos com a vertical:

cospsi1=(L12*sin(fi2+q1)-L11*sin(fil))/(sqrt(L11^2 + L12^2-2*L11*L12*cos(q1-
Dfi)));

cospsi2=(L5*sin(alf2+q2)-L4*sin(alf1))/(sqrt(L4^2 + L5^2-2*L4*L5*cos(q2-
Dalf)));

%Vetor das forças:

Pat=[g*M*cospsi1; g*M*cospsi2];

```

```

%*****VECTOR DAS FORÇAS GRAVITACIONAIS DOS ATUADORES*****:

%cossenos dos ângulos com a vertical:

cospsi1=(L12*sin(fi2+q1)-L11*sin(fi1))/(sqrt( L11^2 + L12^2-
2*L11*L12*cos(q1-Dfi)));

cospsi2=(L5*sin(alf2+q2)-L4*sin(alf1))/(sqrt( L4^2 + L5^2-2*L4*L5*cos(q2-
Dalf)));

%Vetor das forças:

Pat=[g*M*cospsi1; g*M*cospsi2];
%*****VECTOR DAS DERIVADAS DAS FORÇAS GRAVITACIONAIS DOS
ATUADORES*****:

%Derivada do arco-cosseno 1:

sigmaminus1=((L12*cos(fi2+q1)*qpr1)*sqrt( L11^2 + L12^2-2*L11*L12*cos(q1-
Dfi))...
-L12*sin(fi2+q1)*J(1,1)*qpr1)...
/(L11^2 + L12^2-2*L11*L12*cos(q1-Dfi));

%Derivada da força gravitacional do atuador 1

cospsi1p= -g*M*sqrt(1-cospsi1^2)*(-1/(sqrt(1-cospsi1^2)))*sigmaminus1;

%Derivada do arco-cosseno 2:

sigmaminus2=((L5*cos(alf2+q2)*qpr2)*sqrt( L4^2 + L5^2-2*L4*L5*cos(q2-
Dalf))...
-L5*sin(alf2+q2)*J(2,2)*qpr2)...
/(L4^2 + L5^2-2*L4*L5*cos(q2-Dalf));

%Derivada da força gravitacional do atuador 2:

cospsi2p= -g*M*sqrt(1-cospsi2^2)*(-1/(sqrt(1-cospsi2^2)))*sigmaminus2;

%**Vetor das derivadas**

Patp=[cospsi1p; cospsi2p];

%*****

%Matriz diagonal das massas dos atuadores:

Ma=M*eye(2,2);

%Matriz diagonal dos amortecimentos viscosos dos atuadores:

Bv=B*eye(2,2);

%*****CÁLCULO DAS DERIVADAS DAS FORÇAS HIDRÁULICAS DESEJADAS*****:

%Vetor das velocidades:

coll=[qpr1; qpr2];

```

```

%Vetor das acelerações:
col2=[qppr1; qppr2];
%Vetor dos Jerks:
col3=[q3pr1; q3pr2];
%Vetor do erro de seguimento de trajetória:
z=[z1; z2];
%Vetor da derivada do erro de seguimento de trajetória:
zp=[zp1; zp2];
%Matriz dos ganhos:
Kd=[Kd1 0; 0 Kd2];
%Derivada da Força Hidráulica Desejada:
Hbp=Inep + 2*J*Ma*Jp;
Cbp= Cqp + J*Ma*Jpp + Jp*Ma*Jp + 2*J*Bv*Jp;
Fhpd= JIp*([Ine+J*Ma*J]*col2 + [Cq + J*Ma*Jp + J*Bv*J]*col1 + Ga + J*Pat -
[Kd]*z)+...
    inv(J)*([Ine+J*Ma*J]*col3 + Hbp*col2 + [Cq + J*Ma*Jp + J*Bv*J]*col2 +
    ...
    Cbp*col1 + Gap + J*Patp + Jp*Pat - [Kd]*zp);
%*****FIM*****

```



Lei de Controle do Subsistema Hidráulico

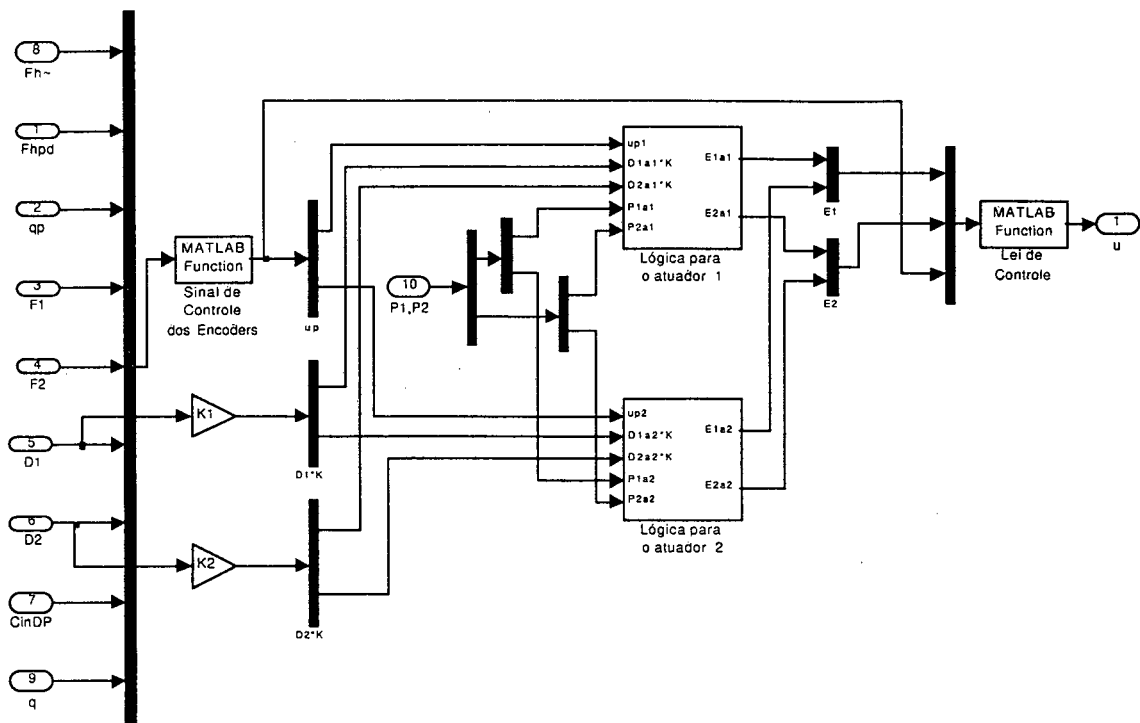


Figura A.18: Diagrama de implementação da lei de controle do subsistema hidráulico.

O diagrama acima exposto permite as seguintes observações:

Observação 1: A derivada da lei de controle do subsistema mecânico é uma das entradas para o cálculo da lei de controle do subsistema hidráulico.

Observação 2: O primeiro multiplexador, da esquerda para a direita, obtém a parcela do sinal de controle que depende dos encoders das juntas do robô. Este sinal foi abordado no capítulo 3 e sua equação é rescrita em A.12.

$$\mathbf{v} = \left( \dot{\mathbf{F}}_{hd} + \hat{\mathbf{R}} \bar{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{S}} \hat{\mathbf{C}}_{in} \mathbf{p}_{\Delta} \right), \quad (\text{A.12})$$

```

%Função que calcula o sinal de controle dos encoders
function [Shid]=Shidra(u)

%Entradas:

Fhtio1=u(1); Fhtio2=u(2);
Fhpd1=u(3); Fhpd2=u(4);
qp1=u(5); qp2=u(6);
F11=u(7); F12=u(8);
F21=u(9); F22=u(10);
D11=u(11); D12=u(12);
D21=u(13); D22=u(14);
CinDP1=u(15); CinDP2=u(16);
q1=u(17); q2=u(18);

global A1 A2 Kp1 Kp2

%*****MATRIZES HIDRÁULICAS*****:

F1=[F11 0; 0 F12]; F2=[F21 0; 0 F22];

D1=[D11 0; 0 D12]; D2=[D21 0; 0 D22];

%*****VETORES HIDRÁULICOS*****:

Fhpd=[Fhpd1; Fhpd2]; Qp=[qp1; qp2];

CinDP=[CinDP1; CinDP2]; Fhtio=[Fhtio1; Fhtio2];

%*****MATRIZ DE TRANSMISSÃO*****:

global L11 L12 Dfi L4 L5 Dalf

J=[L11*L12*sin(q1-Dfi)/sqrt(L11^2 + L12^2 -2*L11*L12*cos(q1-Dfi)) 0;
    0 L4*L5*sin(q2-Dalf)/sqrt(L4^2 + L5^2 -2*L4*L5*cos(q2-Dalf))];

%Matriz dos Ganhos:

Kp=[Kp1 0; 0 Kp2];

%*****PARCELA DA LEI DE CONTROLE HIDRÁULICA*****:

Shid=Fhpd + (A1*F1 + A2*F2)*J*Qp + (A1*D1+A2*D2)*CinDP - [Kp]*Fhtio;

%*****FIM*****

```

Observação 3: Com o sinal obtido na observação 2, calcula-se as funções não-lineares  $E_1(.)$  e  $E_2(.)$  de cada um dos atuadores. Isto é desenvolvido nos blocos denominados: Lógica para o atuador 1 e 2, da figura A.18. Como a topologia dos diagramas de blocos é a mesma, para ambos atuadores, apresenta-se apenas os diagramas do atuador 1.

As figuras A.19 e A.20 ilustram o conteúdo destes blocos para tal implementação.

## LÓGICA PARA O ATUADOR 1

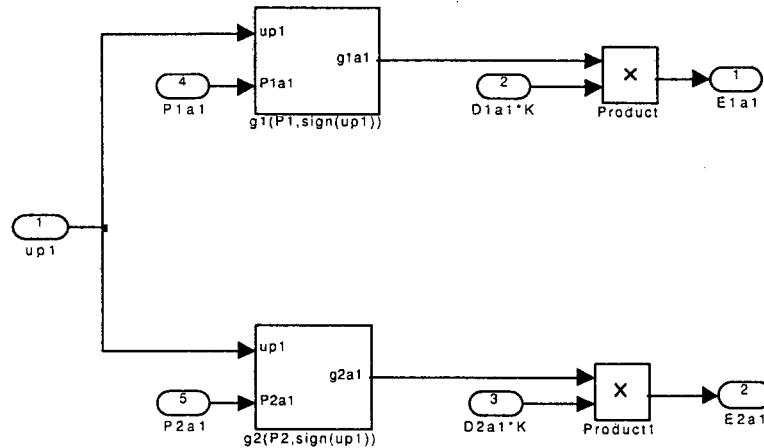


Figura A.19: Cálculo da função não-linear  $\hat{E}_1(q, p, \text{sign}(\hat{u}))$ .

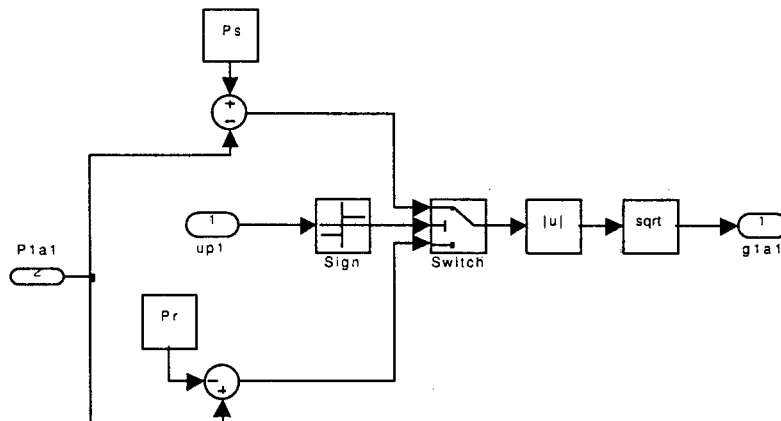
Função não linear  $g_1(P1, \text{sign}(u))$ .

Figura A.20: Cálculo da função não-linear  $g_1(p_1, \text{sign}(x_v))$

Finalmente, após estas observações, a lei de controle do subsistema hidráulico pode ser obtida. A função para a implementação desta lei de controle é exibida na seqüência.

```

%Função que calcula a lei de controle do subsistema hidráulico

function [Shidd]=Shidral(u)

%Entradas:

E11=u(1); E12=u(2);
E21=u(3); E22=u(4);
up1=u(5); up2=u(6);

global A1 A2
%*****MATRIZES HIDRÁULICAS*****:

E1=[E11 0; 0 E12]; E2=[E21 0; 0 E22];

%Vetor dos Controles das Pressões:

Up=[up1; up2];

%*****LEI DE CONTROLE HIDRÁULICA*****:

Shidd=inv(A1*E1 + A2*E2)*(Up);

%*****FIM*****

```

Aqui se encerra a descrição do simulador para um controle usando a estratégia em cascata.

## APÊNDICE B.

### A FORÇA GRAVITACIONAL DO ATUADOR HIDRÁULICO LINEAR

RESUMO: Neste apêndice é desenvolvida a dedução das componentes das forças gravitacionais que os atuadores imprimem sobre as estrutura do robô hidráulico.

A componente da força gravitacional pode ser obtida a partir da figura B.1.

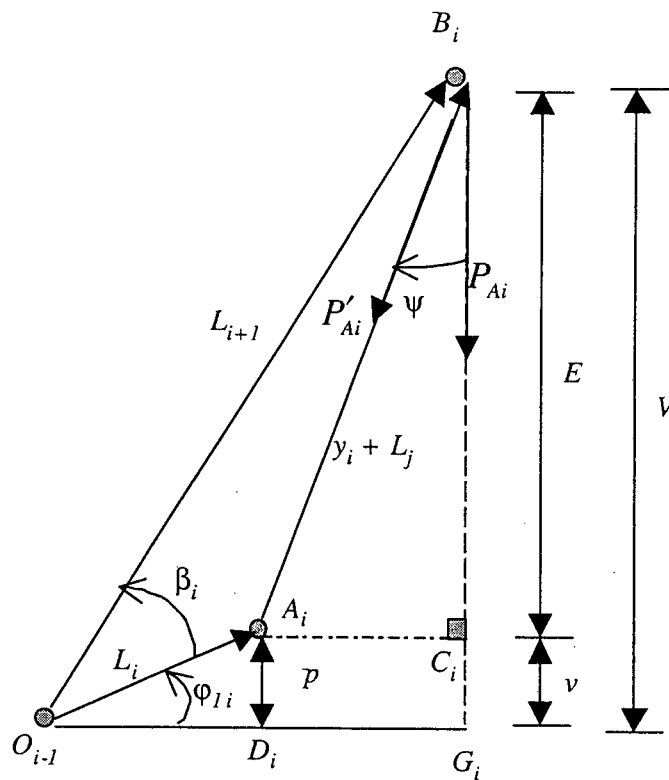


Figura (B.1): Triângulos para a obtenção da componente gravitacional do atuador  $i$ .

Considerando a figura B.1, os ângulos  $\varphi_{1i}$  e  $\beta_i$ , e os segmentos  $L_i$ ,  $L_{i+1}$ ,  $y_i + L_j$  são definidos no capítulo 2. A força gravitacional é representada pelo vetor  $P_{Ai}$  e a letra grega  $\psi$  é o ângulo que a componente desta força ( $P'_{Ai}$ ) faz com a vertical. Esta

componente atua ao longo do segmento  $\overline{A_i B_i}$  onde está definido o movimento linear do atuador.

As seguintes observações podem ser feitas:

Observação 1: As distâncias  $p$  e  $v$  são iguais.

Observação 2: A distância  $V$  é a soma de  $E$  e  $v$ .

A seguir, é estabelecida uma seqüência de passos para a obtenção da força  $P'_{Ai}$ :

1º passo) Considerando o triângulo  $(O_{i-1} A_i D_i)$ , desenvolve-se o cálculo da distância  $v$ .

$$\sin(\varphi_{li}) = \frac{v}{L_i} \quad \therefore \quad v = L_i \sin(\varphi_{li}) \quad (\text{B.1})$$

2º passo) Considerando o triângulo  $(O_{i-1} B_i G_i)$ , calcula-se a distância  $V$ .

$$\sin(\beta + \varphi_{li}) = \frac{V}{L_{i+1}} \quad \therefore \quad V = L_{i+1} \sin(\beta + \varphi_{li}) \quad (\text{B.2})$$

3º passo) Considerando os passos 1 e 2, e baseado no triângulo  $(A_i B_i C_i)$ , calcula-se a distância  $E$ :

$$E = V - v = L_{i+1} \sin(\beta + \varphi_{li}) - L_i \sin(\varphi_{li}) \quad (\text{B.3})$$

4º passo) Obtém-se o cosseno de  $\psi$ .

$$\cos\psi = \frac{E}{y_i + L_j} = \frac{L_{i+1} \sin(\beta + \varphi_{li}) - L_i \sin(\varphi_{li})}{y_i + L_j} \quad (\text{B.4})$$

A partir dos dados acima, a equação B.5 calcula a componente da força gravitacional ao longo da reta de deslocamento do atuador.

$$P'_{Ai} = P_{Ai} \cos(\psi) = m_{Ai} g \frac{L_{i+1} \sin(\beta_i + \varphi_{1i}) - L_i \sin(\varphi_{1i})}{y_i + L_j} \quad (\text{B.5})$$

Como  $\beta_i$  depende do valor da variável de junta  $\theta_i$  (veja equação 2.3), a equação B.5 é reescrita em B.6,

$$P'_{Ai}(\theta_i) = P_{Ai} \cos(\psi(\theta_i)) = m_{Ai} g \frac{L_{i+1} \sin(\beta_i(\theta_i) + \varphi_{1i}) - L_i \sin(\varphi_{1i})}{y_i + L_j} \quad (\text{B.6})$$

onde,  $m_{Ai}$  é a massa do atuador  $i$  e  $g$  é a aceleração da gravidade;

Para o caso de  $n$  elos, assim como ilustrado na figura 2.1, repetida na figura B.2,

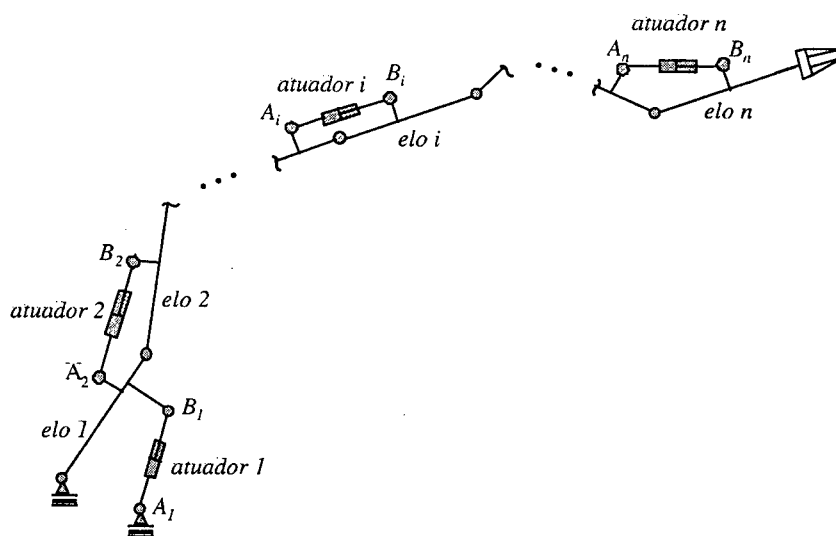


Figura B.2: Robô de juntas rotativas com seus elos acionados por atuadores lineares.

obtém-se o vetor das componentes gravitacionais dos atuadores da estrutura do robô hidráulico.

$$P_{AT} = \begin{bmatrix} P'_{A1}(\theta_1) \\ P'_{A2}(\theta_2) \\ \vdots \\ P'_{An}(\theta_n) \end{bmatrix} \quad (\text{B.7})$$

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDERSEN, T. O. et al; A novel adaptive control scheme for hydraulic actuator motion systems, in: Modelling and Simulation, Proceedings of Sixth Bath International Fluid Power Welding, 1993, pp. 177 – 192.
- [2] ARMSTRONG, B.; Control of machines with friction, Kluwer, Boston, USA, 1991.
- [3] BEINER L., Minimum-Force redundancy control of hydraulic cranes, in: Preprints of the Fifth IFAC Symposium on Robot Control, Nantes, France, 1997, pp. 639 – 644.
- [4] BERNZEN, W.; On vibration damping of hydraulic driven flexible robots, in: Preprints of the Fifth IFAC Symposium on Robot Control, Nantes, France, 1997.
- [5] BERHUIS, H., NIJMEIJER, H.; A passivity approach to controller-observer design for robots, in: IEEE Trans. Robot. Automat., vol. 9, pp. 740 – 754, Dec. 1993.
- [6] BU F., B. Yao, Nonlinear model based coordinated adaptive robust control of electro-hydraulic robotic arms via overparametrizing method, in: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, 2001, pp. 21 – 26.
- [7] BU F., B. Yao, Nonlinear adaptive robust control of hydraulic actuators regulated by proportional directional control valves with deadband and nonlinear flow gains, in: Proceedings of American Control Conference, Chicago, U.S.A., 2000, pp. 4129 – 4133.
- [8] BILODEAU, G.; Papadopoulos, E.; Modelling, identification and experimental validation of a hydraulic manipulator joint for control, in: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Montreal, Canadá, 1997.
- [9] BONCHIS A.; Corke, P.I.; Rye, D.C.; Ha, Q.P.; Variable structure methods in hydraulic servo systems control, in: Automatica 37 (2001) pp. 589 – 595.
- [10] CLEGG, A.C., DUNNIGAN, M.W., LANE, D.M.; Self-tuning position and force control of an underwater hydraulic manipulator; in: Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation; Seul, Korea, pp. 3226 – 3231, 2001.
- [11] CRAIG, J. J.; Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1986.



- [12] CUNHA, M.A.B.; Controle em cascata com adaptação de parâmetros aplicado a um atuador hidráulico, in: Florianópolis, Dissertação(Mestrando em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.
- [13] CUNHA, M.A.B.; Guenther, R.; De Pieri, E.R.; Robustness analysis of cascade controller applied to a hydraulic actuator, in: Congresso de Ingeniería Eléctrica, Temuco, 1997, Vol. 2, pp. 479 – 484.
- [14] CUNHA, M.A.B.; Guenther, R.; De Pieri, E.R.; Controle em cascata com adaptação de parâmetros aplicado a um atuador hidráulico, in: Congresso Brasileiro de Automática, Uberlândia, 1998, pp. 211 – 216.
- [15] CUNHA, M.A.B.; Controle em cascata de um atuador hidráulico:contribuições teóricas e experimentais, in: Florianópolis, Tese (Doutorando em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- [16] DE NEGRI, V. J.; Estudo do comportamento dinâmico de sistemas hidráulicos; Apostila do Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos; Universidade Federal de Santa Catarina, julho de 1988.
- [17] DE WIT, C.C., SLOTINE, J.J.E.; Sliding observers for robot manipulators; Automatica, Vol. 27, nº 5, pp. 859 – 864, 1991.
- [18] DE WIT, C.C. , SICILIANO, B., BASTIN, G., Theory of Robot Control; Springer-Verlag London Limited, 1996.
- [19] D'AZZO, J. J.; HOUPIS, C. H.; Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares; 2ª Edição, Rio de Janeiro, Editora Guanabara S. A., 1981.
- [20] FRANKLIN, G. F.; POWELL, J.D.; EMAMI-NAEINI, A.; Feedback Control of Dynamic Systems; Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1994.
- [21] GUENTHER, R.; Hsu,L.; 1993. Variable structure adaptive cascade control of rigid-link electrically-driven robot manipulators, in; Proceedings of the IEEE Conference on Decision & Control (32.: Dec. 1993: San Antonio, Texas), pp. 2137 – 2142.
- [22] GUENTHER, R.; De Pieri, E. R.; Cascade control of the hydraulic actuators, in: Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, Vol. 19, 1997, pp. 108 – 120.
- [23] GUENTHER, R.; Pieri E.R.; Cunha, M.A.B.; Cascade position control of hydraulic actuators for robots manipulators., in: Technical Report – 7º DINAME, Angra dos Reis, RJ, Brazil, 1997a.

- [24] GUENTHER, R.; Cunha, M.A.B.; De Pieri E. R.; Paim, C.C.; Controle em cascata de um atuador hidráulico, in: IV Encontro Latino Americano de Fluido Mecânica, Itajubá, MG, 1997b.
- [25] GUENTHER, R.; Cunha, M.A.B.; De Pieri E. R.; Experimental implementation of variable adaptive cascade control for hydraulic actuators, in: Power Transmission and Motion Control, Bath, September, pp. 349 – 361, 1998.
- [26] GUENTHER, R.; Cunha, M.A.B.; De Pieri E. R.; De Negri, V. J.; Variable adaptive cascade control for hydraulic actuators, in: Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, 1999.
- [27] GUNNARSSON, S. and Krus, P.; LQG control of a flexible mechanical structure using hydraulic actuators, in: Modeling and Simulation, Proceedings of Sixth Bath International Fluid Power Workshop, 1994, pp. 280 – 294.
- [28] HABIBI, S.R.; Sliding mode control of a hydraulic industrial robot, in: Transactions of the ASME, Vol. 121, 1999, pp. 312 – 318.
- [29] HABIBI, S. R.; Goldenberg, A. A.; Design and control of a reconfigurable industrial hydraulic robot, in: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995, pp. 2206 – 2211.
- [30] HABIBI, S. R. et al; Hydraulic actuator analysis for industrial robot multivariable control, in: Proceedings of the American Control Conference, Baltimore, USA, 1994, pp. 1003 – 1007.
- [31] HSU, L.; Guenther, R.; 1993. Variable structure adaptive cascade control of multi-link robot manipulators with flexible joints: the case of arbitrary uncertain flexibilities, in: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Georgia, 1993, pp. 340 – 345.
- [32] HONEGGER, M., CORKE, P.; Model-Based control of hydraulic actuated manipulators, in: Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Seoul, Korea, May, 2001, pp 2553 – 2559.
- [33] IAGNEMMA, K; A model-free fine position control method using the base-sensor: with application to a hydraulic manipulator, in: Preprints of the Fifth IFAC Symposium on Robot Control, Nantes, France, 1997, pp. 359 – 365.
- [34] KUO, B.C.; Sistemas de Controle Automático; 4ª Edição, Prentice-Hall do Brasil, 1985.
- [35] KHALIL, H.K.; Nonlinear Systems; 2ª edição, Prentice-Hall, New Jersey, 1996.

- [36] LOPES, L.G.C.O.; Controle a estrutura variável aplicado a um atuador hidráulico. Dissertação de mestrado, Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.
- [37] LINSINGEN, I. V.; Fundamentos de Sistemas Hidráulicos, 1ª Edição, Editora da UFSC, 2001.
- [38] LISCHINSKY, P., CANUDAS-de-WIT C., MOREL, G.; Friction compensation for an industrial hydraulic robot; in: Proceedings of the IEEE Control Systems; pp: 25 – 32; February, 1999.
- [39] LEWIS, F.L.; C. T. Abdallah; D.M. Dawson; “Control of robot manipulators”. Macmillan Publishing Company. New York, 1993.
- [40] MEDANIC, J., YUAN, M., MEDANIC, B.; Robust multivariable nonlinear control of a two link excavator: Part I; in: Proceedings of the 36th IEEE CDC , pp. 4231 – 4236; San Diego, Dec. 1997,
- [41] MERRIT, H.E.; Hydraulic Control Systems. John Wiley & Sons Inc., 1967.
- [42] M'SIRDI, N.K et al; Sliding mode control for a hydraulic underwater manipulator, in: Preprints of the Fifth IFAC Symposium on Robot Control, Nantes, France, 1997, pp. 145 – 151.
- [43] PAPADOPOULOS, E. et al; On the modeling and control of an experimental harvester machine manipulator, in: Proceedings of the IEEE I.R.O.S., 1997, pp. 1832 – 1837.
- [44] PAIM, C.C.; Técnicas de controle aplicadas a um atuador hidráulico. Dissertação de mestrado, Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.
- [45] VOSSOUGH, G.; Donath, M.; Dynamic feedback linearization for electrohydraulic actuated control systems, in: Transactions of the ASME, Vol. 117, 1995, pp. 468 – 477.
- [46] SEPEHRI, N. et al; Cascade control of hydraulic actuated manipulators, in: Robotica, 1990, Vol. 8, pp. 207 – 216.
- [47] SEPEHRI, N. et al; Simulation and experimental studies of gear backlash and stick-slip friction in hydraulic excavator swing motion, in: Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control, september, 1996, Vol. 118, pp. 463 – 467.
- [48] SEPEHRI, N. et al; Development of a nonlinear PI controller for accurate positioning of an industrial hydraulic manipulator, in: Mechatronics, Vol. 7, No. 8, 1997, pp. 683 – 700,.

- [49] SLOTINE, J.J.E. and W. Li; "Adaptive robot control", a case study", in: IEEE Trans. Autom. Control, November, 1988, pp. 33 – 44.
- [50] SCIAVICCO, L.; Siciliano, B. ; "Modeling and control of robot manipulators". The MacGraw-Hill Companies, Inc., 1996.
- [51] SLOTINE, J.J.E. and LI, W.; Applied Nonlinear Control. Prentice-Hall Inc. 1991.
- [52] SIROUSPOUR, M.R., Salcudean, S. E., in: IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, NO. 2, April 2001.
- [53] TAFAZOLI, S. et al; Position and force control of an electrohydraulic manipulator in the presence of friction, in: Proceedings of the IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 6, n° 6, pp. 402 – 411, May, 1998.
- [54] UTKIN, V.I.; Discontinuous control systems: state of art in theory and applications; in: IFAC World Congress on Automatic Control, 1987, Munich, Vol. 1, pp. 75 –94.
- [55] VALDIERO, A. C.; SANTOS, C. H. F. DOS; Matriz de transmissão entre o deslocamento linear de um atuador linear e o deslocamento angular do elo de um robô antropomórfico; Relatório de Pesquisa do Laboratório de Robótica; UFSC, 2001.
- [56] VALDIERO, A. C.; Projeto e implementação de controladores para atuadores hidráulicos; Relatório de Pesquisa do Laboratório de Robótica; UFSC, 2001.
- [57] ZHOU, J.; Experimental evaluations of a kinematic compensation control method for hydraulic robot manipulators, in: Control Eng. Practice, Vol. 3, No. 5, pp. 675 – 684, 1995.