

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**VINÍCIUS MENEZES DE OLIVEIRA**

**ESTUDO E CONTROLE DE ROBÔS  
BRACEJADORES SUBATUADOS**

Porto Alegre  
2008



**VINÍCIUS MENEZES DE OLIVEIRA**

**ESTUDO E CONTROLE DE ROBÔS  
BRACEJADORES SUBATUADOS**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação e Instrumentação Eletro-Eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Walter Fetter Lages

Porto Alegre  
2008



**VINÍCIUS MENEZES DE OLIVEIRA**

**ESTUDO E CONTROLE DE ROBÔS  
BRACEJADORES SUBATUADOS**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Walter Fetter Lages, PPGEE  
Doutor pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – São José dos Campos, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marco Henrique Terra, USP  
Doutor pela Universidade de São Paulo – São Carlos, Brasil

Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense, UFMG  
Doutor pela Colorado School of Mines – Golden, Estados Unidos

Prof. Dr. Eduardo André Perondi, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Prof. Dr. João Manoel Gomes da Silva Jr., UFRGS  
Doutor pela Universidade Paul Sabatier – Toulouse, França

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Brasil

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Arturo Suman Bretas

Porto Alegre, junho de 2008.



## DEDICATÓRIA

Ao final dessa jornada é chegada a hora de parar, olhar para trás e observar o caminho trilhado. Momento para refletir sobre as experiências vividas não somente ao longo do curso de Doutorado, mas durante toda a vida. Tenho a convicção de que não é apenas mais uma conquista acadêmica e, sim, uma realização pessoal.

Desse modo, dedico esse trabalho a três pessoas fundamentais em minha vida, que colocaram meus anseios como seus próprios objetivos de vida e que se dedicaram sobremaneira para que essa jornada me fosse menos cansativa: meu pai, minha mãe e minha esposa.

A vocês, meu amor e gratidão eternos.

Felicidade e todo bem hão de seguir-me, por toda a minha vida;  
e, na casa do Senhor, habitarei pelos tempos infinitos.  
(Salmo 22)





## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Walter Lages. Sua compreensão sobre Robótica (e todas as áreas que se relacionam com esse assunto) e sua dedicação ao ensino e à pesquisa, ao longo desses anos de convívio, permitiram-me adquirir um entendimento sobre o que seja um trabalho de doutoramento em sua plenitude, além de me possibilitar um amadurecimento científico e didático. Não posso deixar de agradecer-lhe, também, pela constante disponibilidade e ajuda para superar as dificuldades encontradas.

Durante esse período no DELET/UFRGS muitas foram as pessoas com quem convivi e que compartilhei momentos de dúvida, incerteza e momentos de muita alegria e descontração. Meus sinceros agradecimentos a Lucíola Campestrini, Jorge Alves, Felipe Kühne, Miguel Moretto, Alessandra Vargas, Lorenzo Taddei, Jefferson Flores e Diego Eckhard pelas horas livres no Bar da Arquitetura e no Bar do Antônio e pela troca de experiência técnica nas conversas mais sérias.

Não poderia deixar de expressar meu agradecimento aos professores Carlos Eduardo, João Manoel e Renato Ventura pelas discussões técnicas, pelo exemplo e dedicação e, também, pelo constante incentivo para a realização deste trabalho. Ao Prof. Carlos Eduardo meu destacado agradecimento por me propiciar o contato inicial com o Prof. Fukuda. Também não poderia esquecer os funcionários e colaboradores da secretaria do PPGEE, que sempre me foram solícitos e atenciosos. De maneira especial agradeço à Miriam e à Janice toda a ajuda que me ofereceram.

Especial agradecimento dispenso ao Prof. Toshio Fukuda e a toda a sua equipe, que me receberam no Japão de maneira acolhedora e me disponibilizaram toda a infraestrutura necessária para desenvolver meus estudos. Em especial agradeço aos amigos Ricardo Carnieri e Roberto Myiamoto pela ajuda que me deram durante a realização do estágio. Agradeço também à equipe que trabalha diretamente com multilocomoção: Mikiko Kojo, Hironari Yoneda, Zhenghuan Yin, Hiroyosi Sawada e Prof. Yasuhisa Hasegawa.

A realização deste trabalho só foi possível pela implementação do convênio entre o PPGEE/UFRGS e a FURG, através do Programa de Qualificação Institucional (PQI 139/03-0), financiado pela CAPES. Agradeço aos colegas do DMAT/FURG pela confiança depositada no meu trabalho e à equipe da SUPPOSG/FURG, de modo especial ao Cláudio, por todo suporte e auxílio administrativo. Não poderia deixar de agradecer, de maneira muito especial, aos colegas e amigos Nelson e Sílvia pelo apoio e incentivo incondicional que me deram, além, claro, das constantes cobranças para o término desse trabalho.

Finalmente, expresso minhas saudações àqueles que me são mais próximos. Agradeço de modo muito especial a meus pais (Elbio e Jussara) e a minha família, sem os

quais o meu esforço teria sido em vão, pois seria insuficiente para superar todas as dificuldades. Peço a eles desculpa pelas vezes que me ausentei da vida familiar, imerso na responsabilidade de não lhes decepcionar durante a concretização desse sonho.

À Letícia, minha esposa e amiga, agradeço pela sua doação incondicional e irrestrita para tornar possível essa conquista.

Por último, e certamente de modo mais profundo, agradeço a Deus por ter enviado todas essas pessoas para me auxiliar durante o caminho percorrido.

## RESUMO

À medida que se apresentam grandes avanços tecnológicos nas áreas de instrumentação, controle e acionamento, se torna cada vez mais difundida a utilização de sistemas robóticos para a execução dos mais variados tipos de tarefas, como na exploração de petróleo ou mesmo no transporte de cargas. Desse modo, diversas são as situações em que se torna necessário o uso de sistemas subatuados, despertando o interesse da comunidade científica, quer seja pela variadas situações em que se pode utilizar esse tipo de robô ou mesmo pelo desafio que se apresenta o desenvolvimento de estratégias de controle de tais sistemas.

Nesta tese propõe-se um modelo de robô bracejador, juntamente com o desenvolvimento dos modelos matemáticos que descrevem o comportamento cinemático e dinâmico desse robô e a respectiva análise desses modelos. Além disso, o presente trabalho tem por objetivo apresentar uma estrutura de controle em malha fechada que seja capaz de fazer com que o robô se desloque ao longo de uma linha horizontal.

Diferentes estratégias de controle já foram apresentadas para o controle de robôs bracejadores, mas, em sua maioria, possuem limitações quanto ao tipo de bracejamento que o robô pode executar, além de não considerarem nenhuma restrição no sistema. Dessa maneira, emprega-se a estratégia de controle preditivo, com horizonte de predição deslizante, a qual permite que, para o cálculo da lei de controle, sejam consideradas restrições às variáveis de estado e de entrada durante a solução do problema de otimização.

A partir da definição do objetivo e da abordagem de controle a ser utilizada, várias simulações são realizadas com o intuito de validar a aplicação do controlador preditivo para o controle do robô bracejador, sendo o robô capaz de executar diferentes tipos de bracejamento (tanto bracejamento único quanto bracejamento contínuo, do tipo *under-swing* e *over hand*) ao longo da linha de sustentação. São desenvolvidas duas versões para o controlador proposto, uma baseada em modelo não-linear da dinâmica para ser utilizado no horizonte de predição e outra considerando uma versão linearizada para o modelo da dinâmica.

Os resultados obtidos pelas diferentes simulações mostram que a solução proposta para o problema de movimentar o robô bracejador atingiu seus objetivos de modo bastante eficiente, possibilitando, inclusive, a realização de simulações que atendessem a requisitos de tempo real.

**Palavras-chave: Robôs bracejadores, sistemas não-lineares subatuados, controle preditivo baseado em modelo.**



## ABSTRACT

As we are observing, the fast technological development in the fields of instrumentation, control and actuation are increasing the employment of robotic systems for the execution of a large variety of tasks, for example, oil exploration or load transportation. In this way, there are many situations where it is necessary to use underactuated systems, which are getting attention of the scientific community due to the different applications of underactuated robots or even due to the challenge to design control strategies for such systems.

In this thesis we propose a brachiation robot model, with the derivation of mathematical models for its kinematics and dynamics and analyse such models. Moreover, the aim of this work is to propose a closed loop control architecture that will drive the robot to move along the horizontal line.

Many different control schemes have already been proposed in the literature to control brachiation robots, however, most of such schemes are limited concerning the way the robot executes the brachiation movement. Moreover those control strategies are not able to deal with constraints on the state and/or control variables. Thus, we present in this thesis a control scheme based on the predictive control strategy, with receding horizon, which can take into account such constraints during the solution of the optimization problem for the control input computation.

After defining the task to be executed and the control strategy to be used, we have simulated different situations of the robot aiming the validation the employment of the predictive control approach for the brachiation robot. The robot is able to execute different types of brachiation (only one cycle or continuously motion, with under-swing and over hand motion) along the supporting line. We have developed two versions to the proposed controller, the first one considering a nonlinear dynamic model during the prediction horizon and the second considering a linearized dynamic model for prediction.

The results from the different simulation show that the solution presented in this work for the brachiation robot motion was successful, making the robot able to move from one position to a forwarded position in the line. Furthermore, simulations have indicated the overall system can be executed under real time requirements.

**Keywords: Brachiation robots, underactuated nonlinear systems, model-based predictive control.**



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1:	Diferentes aplicações para robôs de serviço. . . . .	24
Figura 2:	Robô anelídeo. . . . .	25
Figura 3:	Um macaco realizando bracejamento. . . . .	26
Figura 4:	Protótipos construídos no laboratório do Prof. Fukuda – Univerdade de Nagoya. . . . .	26
Figura 5:	Movimento de bracejamento único ( <i>swing-up brachiation</i> ). . . . .	27
Figura 6:	Movimento de bracejamento contínuo ( <i>rope brachiation</i> ). . . . .	27
Figura 7:	Movimento de bracejamento rápido ( <i>ricochetal brachiation.</i> ) . . . . .	27
Figura 8:	Conceito de robô multilocomoção. . . . .	29
Figura 9:	Robô Gorilla III. . . . .	30
Figura 10:	Robô bracejador considerado no trabalho. . . . .	34
Figura 11:	Definição dos parâmetros de D-H. . . . .	37
Figura 12:	Esquema de atuação considerado neste trabalho. . . . .	45
Figura 13:	Protótipo desenvolvido no Departamento de Controle Automático do Instituto de Tecnologia de Lund. . . . .	48
Figura 14:	Protótipo do Acrobot desenvolvido no Departamento de Eng. Elétrica e de Computação da Universidade de Toronto. . . . .	49
Figura 15:	Estrutura do controlador baseado em comportamento hierárquico. . . . .	52
Figura 16:	Modelo simplificado de robô bracejador multi-locomoção. . . . .	53
Figura 17:	Diferentes classificações para os algoritmos MPC. . . . .	55
Figura 18:	Princípio de funcionamento do MPC. . . . .	57
Figura 19:	Visão geral do esquema de controle preditivo. . . . .	58
Figura 20:	Estrutura genérica da estratégia de controle preditivo. . . . .	59
Figura 21:	MPC com modelo não-linear de predição. . . . .	62
Figura 22:	Robô virtual utilizado como referência. . . . .	64
Figura 23:	MPC com modelo linearizado de predição. . . . .	64
Figura 24:	Robô bracejador utilizado nas simulações. . . . .	71
Figura 25:	Posição angular de cada junta (simulação 1). . . . .	73
Figura 26:	Velocidade angular de cada junta (simulação 1). . . . .	74
Figura 27:	Torques aplicados ao robô (simulação 1). . . . .	75
Figura 28:	Trajetória XY executada pelo robô (simulação 1). . . . .	75
Figura 29:	Posição angular (e referência) de cada junta (simulação 2). . . . .	77
Figura 30:	Velocidade angular (e referência) de cada junta (simulação 2). . . . .	78
Figura 31:	Torques aplicados ao robô (simulação 2). . . . .	78

Figura 32:	Perturbações de torque de entrada (simulação 2). . . . .	79
Figura 33:	Trajétoria XY executada pelo robô (simulação 2). . . . .	80
Figura 34:	Erro referente às coordenadas cartesianas (simulação 2). . . . .	80
Figura 35:	Posição angular (e referência) de cada junta (simulação 3). . . . .	81
Figura 36:	Velocidade angular (e referência) de cada junta (simulação 3). . . . .	82
Figura 37:	Torques aplicados ao robô (simulação 3). . . . .	82
Figura 38:	Perturbação no sinal de controle (simulação 3). . . . .	83
Figura 39:	Trajétoria XY realizada pelo robô (simulação 3). . . . .	83
Figura 40:	Erro nas coordenadas cartesianas (simulação 3). . . . .	84
Figura 41:	Trajétoria realizada pelo robô durante recuperação de movimento (caso 1 – simulação 4). . . . .	86
Figura 42:	Torque exigido para recuperar o movimento (caso 1 – simulação 4). . . . .	87
Figura 43:	Trajétoria realizada pelo robô durante recuperação de movimento (caso 2 – simulação 4). . . . .	87
Figura 44:	Torque exigido para recuperar o movimento (caso 2 – simulação 4). . . . .	88
Figura 45:	Trajétoria cartesiana realizada pelo robô – bracejamento <i>over hand</i> (simulação 5). . . . .	89
Figura 46:	Posição angular – bracejamento <i>over hand</i> (simulação 5). . . . .	89
Figura 47:	Velocidade angular – bracejamento <i>over hand</i> (simulação 5). . . . .	90
Figura 48:	Torque necessário para realizar o movimento – bracejamento <i>over hand</i> (simulação 5). . . . .	90
Figura 49:	Trajétoria cartesiana realizada pelo robô (simulação 6 – $N_1 = 5$ ). . . . .	93
Figura 50:	Torque aplicado por cada motor (simulação 6 – $N_1 = 5$ ). . . . .	93
Figura 51:	Posição angular de cada junta (simulação 6 – $N_1 = 5$ ). . . . .	94
Figura 52:	Tempo necessário para cálculo do sinal de controle (simulação 6 – $N_1 = 5$ ). . . . .	94
Figura 53:	Trajétoria cartesiana realizada pelo robô (simulação 6 – $N_2 = 3$ ). . . . .	95
Figura 54:	Torque aplicado por cada motor (simulação 6 – $N_2 = 3$ ). . . . .	96
Figura 55:	Posição angular de cada junta (simulação 6 – $N_2 = 3$ ). . . . .	96
Figura 56:	Tempo necessário para cálculo do sinal de controle (simulação 6 – $N_2 = 3$ ). . . . .	97
Figura 57:	Trajétoria executada pelo robô – simulação 7. . . . .	98
Figura 58:	Torque aplicado na junta 2 (simulação 7). . . . .	99
Figura 59:	Torque aplicado na junta 3 (simulação 7). . . . .	99
Figura 60:	Posição angular da junta 1 (simulação 7). . . . .	100
Figura 61:	Posição angular da junta 2 (simulação 7). . . . .	100
Figura 62:	Posição angular da junta 3 (simulação 7). . . . .	101
Figura 63:	Tempo necessário de computação – simulação 7. . . . .	101



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Tabela com os parâmetros da convenção D-H. . . . .	38
Tabela 2:	Parâmetros da dinâmica do robô. . . . .	71
Tabela 3:	Valores máximo e mínimo para as variáveis (simulação 1). . . . .	73
Tabela 4:	Valores das restrições para as variáveis de decisão (simulação 2). . . . .	77
Tabela 5:	Parâmetros da dinâmica do robô. . . . .	85
Tabela 6:	Valores máximo e mínimo para as variáveis (simulação 5). . . . .	91



## LISTA DE ABREVIATURAS

IFR	<i>International Federation of Robotics</i>
MPC	<i>Model-based Predictive Control</i>
NMPC	<i>Nonlinear Model-based Predictive Control</i>
LMPC	<i>Linear Model-based Predictive Control</i>
PDAC	<i>Passive Dynamic Autonomous Control</i>
UNECE	<i>United Nations Economic Commission for Europe</i>
V/STOL	<i>Vertical/Short Take-off and Landing</i>
PVTOL	<i>Planar Vertical Take-off and Landing</i>
UKF	<i>Unscented Kalman Filtering</i>
DSFS	<i>Dynamic Switching Fuzzy Systems</i>
EBC	<i>Explanation Based Control</i>
D-H	<i>Denavit-Hartenberg</i>
E-L	<i>Euler-Lagrange</i>
LQR	<i>Linear Quadratic Regulator</i>
LMI	<i>Linear Matrix Inequality</i>
RH	<i>Receding Horizon</i>
QP	<i>Quadratic Programming</i>
PID	Proporcional-Integral-Derivativo



## LISTA DE SÍMBOLOS

$q$	Vetor de coordenadas generalizadas
$\dot{q}$	Vetor velocidade de coordenadas generalizadas
$\ddot{q}$	Vetor aceleração de coordenadas generalizadas
$n$	Dimensão do espaço de estado
$m$	Dimensão do espaço de controle
$n_{GL}$	Número de graus de liberdade
$\alpha(q, \dot{q})$	Restrições genéricas nas coordenadas e velocidades generalizadas
$\Delta$	Distribuição
$m_i$	Massa do elo $i$
$l_i$	Comprimento do elo $i$
$\theta_i$	Variável angular da junta $i$
$\mathcal{L}$	Lagrangeano
$E_c$	Energia cinética
$E_p$	Energia potencial
$M(q)$	Matriz de inércia
$V(q, \dot{q})$	Matriz com os termos centrífugos e de Couriolis
$G(q)$	Vetor com os termos gravitacionais
$B(q)$	Matriz de acoplamento das entradas
$u$	Vetor de entradas de controle
$\tau$	Vetor de torques de entrada
$v_i$	$i$ -ésimo elemento do vetor $V(q, \dot{q})\dot{q}$
$g_i$	$i$ -ésimo elemento do vetor de termos gravitacionais $G(q)$
$\tau_{max}$	Limite máximo de torque
$\tau_{min}$	Limite mínimo de torque
$\wedge$	Produto exterior
$h_i$	$v_i + g_i$

$\omega_{ij}$	Forma diferencial de primeira ordem
$p$	Momento generalizado
$\mathcal{X}$	Conjunto convexo fechado para o estado
$\mathcal{U}$	Conjunto convexo fechado para o controle
$\delta$	Intervalo de tempo
<b>C</b>	Matriz de restrição linear no estado
<b>D</b>	Matriz de restrição linear no controle
$N$	Horizonte de predição
$\Phi(\cdot)$	Função objetivo e/ou função custo
$\Omega$	Custo terminal
<b>Q</b>	Matriz de ponderação do erro de estado
<b>R</b>	Matriz de ponderação do erro de controle
$P$	Vetor de ponderação do custo terminal
$\bar{Q}$	Matriz de ponderação do erro de estado aumentado
$\bar{R}$	Matriz de ponderação do erro de controle aumentado
$x^*$	Seqüência ótima de estado
$u^*$	Seqüência ótima de controle
$\Phi^*(\cdot)$	Função objetivo ótima
$B_\rho$	Região do espaço de estado
$\beta$	Constante
$\ \cdot\ $	Norma do vetor
$T$	Período de amostragem
$\bar{x}$	Variável de estado aumentado
$\bar{u}$	Variável de controle aumentado
$\tilde{x}$	Vetor de erro de estado
$\tilde{u}$	Vetor de erro de controle
$x_r$	Estado de referência
$u_r$	Controle de referência
<b>H</b>	Matriz Hessiana
$\tilde{\Psi}$	Função objetivo
$\mathcal{P}(k, x(k))$	Problema de otimização
$X$	Vetor de coordenadas cartesianas
$x, y$	Componentes da coordenada cartesiana

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	23
1.1	Sistemas Mecânicos Subatuados	29
1.2	Restrições Não-holonômicas de Segunda Ordem	31
1.2.1	Condições de Integrabilidade	32
1.3	Contribuição do Trabalho	33
1.4	Organização do Texto	35
<b>2</b>	<b>MODELOS DINÂMICO E CINEMÁTICO DE SISTEMAS MECÂNICOS</b>	37
2.1	Modelo Cinemático Direto	37
2.2	Modelo Dinâmico	39
2.2.1	Equações de Euler-Lagrange	39
2.2.2	Forma Normal de Legendre	39
2.2.3	Simetria	40
2.2.4	Sistemas Mecânicos Totalmente Atuados	40
2.2.5	Sistemas Mecânicos Subatuados	41
2.3	Linearização Parcial	41
2.3.1	Linearização Parcial Colocada	42
2.3.2	Linearização Parcial Não-colocada	43
2.4	Dinâmica do Robô Bracejador	43
2.5	Análise das Restrições	45
2.5.1	Aplicação do Teorema de Frobenius	45
<b>3</b>	<b>ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PARA ROBÔS BRACEJADORES SUBATUADOS</b>	47
3.1	Controle de Robôs Subatuados	47
3.2	Controle de Robôs Bracejadores	51
3.3	Considerações Gerais	53
<b>4</b>	<b>CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO</b>	55
4.1	Formulação do Problema MPC	59
4.2	Análise de Estabilidade	62
4.3	Abordagem MPC Linear	63
<b>5</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS</b>	69
5.1	Controle do Robô Bracejador	70
5.2	Simulação	71
5.2.1	Simulação 1: Modelo Não-linear – Ponto de Referência	72
5.2.2	Simulação 2: Modelo Não-linear – Trajetória de Referência	76

5.2.3	Simulação 3: Modelo Linear – Trajetória de Referência . . . . .	81
5.2.4	Simulação 4: Recuperação de Movimento . . . . .	85
5.2.5	Simulação 5: Bracejamento tipo <i>Over Hand</i> . . . . .	86
<b>5.3</b>	<b>Implementação e Resultados em Tempo Real . . . . .</b>	<b>91</b>
5.3.1	Simulação 6: Modelo Não-linear – Tempo Real . . . . .	92
5.3.2	Simulação 7: Modelo Linearizado – Tempo Real . . . . .	98
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>103</b>
6.1	Perspectivas Futuras . . . . .	105
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>107</b>



# 1 INTRODUÇÃO

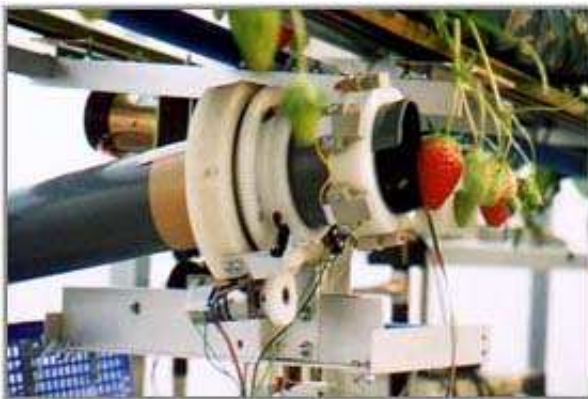
Ao longo das últimas décadas tem se difundido o uso de sistemas robóticos em diversas atividades automatizadas, com perspectiva de se chegar à marca de um milhão de robôs industriais em operação ao fim desta década, segundo a UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) (UNECE, 2004). A indústria, de um modo geral, utiliza robôs para a execução de tarefas com alto grau de repetição, difíceis de serem realizadas e, geralmente, em ambientes que se caracterizam por apresentar riscos à integridade física (até mesmo risco de morte) dos trabalhadores humanos.

Como se pode imaginar, vários segmentos empregam em sua linha de produção algum tipo de robotização, apresentando maior ou menor grau de automação. O setor produtivo que mais se beneficia do uso de robôs é a indústria automobilística, onde a maior parte das tarefas de montagem e soldagem é realizada por robôs manipuladores.

Apesar do elevado número de robôs industriais, é grande o crescimento da aplicação de robôs no setor de serviços. Avanços tecnológicos nas áreas de sensores (com o desenvolvimento de instrumentos mais precisos e variados), controle (estratégias mais robustas de controle e novas técnicas de localização) e acionamento (atuadores mais leves e mais precisos) permitem a implementação de sistemas robóticos inteligentes para aplicação em outras áreas além da produção industrial. De acordo com a IFR (International Federation of Robotics – <http://www.ifr.org>), um robô de serviço é um robô que executa tarefas úteis ao bem-estar do Homem, operando de forma autônoma ou parcialmente autônoma. Podem ser robôs manipuladores, móveis ou, ainda, uma combinação de ambos.

Várias são as situações em que se pode imaginar a utilização de robôs de serviço, como em postos de abastecimento de veículos (Figura 1(d)), agricultura (Figura 1(a)), operação em usinas nucleares (Figura 1(c)), entretenimento (Figura 1(b)), entre diversas outras aplicações. É evidente que muitas outras aplicações de robôs de serviço podem ser mencionadas, mas uma aplicação em especial vem recebendo grande destaque tanto pela comunidade científica quanto pelas empresas especializadas: a tarefa de inspeção. Esse tipo de tarefa, de modo geral, envolve operações tediosas e alto custo financeiro. Além disso, a utilização de operadores humanos inspecionando visualmente favorece à desatenção e, conseqüentemente, a falhas no processo de inspeção. Uma ampla revisão sobre robôs de serviço pode ser encontrada em (SCHRAFT; SCHMIERER, 2000).

Sistemas robóticos para inspeção são utilizados, já há algum tempo, em depósitos de material radioativo e em limpeza e inspeção de dutos. Dentre a grande diversidade de tarefas de inspeção, tem-se como importante aplicação a inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica. Atualmente o procedimento adotado para a verificação das linhas de transmissão apresenta grande risco de morte para os técnicos envolvidos, o que por si só justificaria o desenvolvimento de sistemas para a automação dessa tarefa. Além disso, os custos para a realização do procedimento são altos e exigem um longo intervalo de tempo



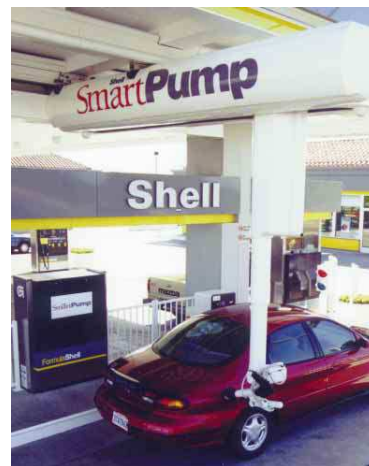
(a) Faculdade de Agricultura – Universidade de Okayama



(b) Professor de golfe



(c) Flangebot – *Remote Ocean Systems Ind.*



(d) Shell Smart-Pump – Sacramento/USA

Figura 1: Diferentes aplicações para robôs de serviço.

para serem executados.

Inicialmente, a linha de transmissão de energia era inspecionada por técnicos suspensos em gôndolas, mas logo começou a utilização de helicóptero para sobrevoar as linhas de transmissão com o técnico a bordo para realizar a inspeção. Na existência da possibilidade de defeito, uma equipe de técnicos seria enviada ao local para uma análise mais detalhada para determinar se a imperfeição caracteriza uma situação que requisesse manutenção. Nos últimos anos, com a rápida evolução tecnológica, as empresas têm vislumbrado a possibilidade de se empregar sistemas robóticos para a realização ou, pelo menos, para auxílio desta tarefa de inspeção.

Os principais trabalhos sobre a automação da tarefa de inspeção de linhas de transmissão são indicados na bibliografia (ARACIL et al., 2002; CAMPOS et al., 2003; CÔTÉ; MONTAMBAULT; ST-LOIUS, 2000; FAUCHER et al., 1996; JIANG; MAMISHEV, 2004; LI; LIJIN; HONGGUANG, 2004; LIANG; LI; TAN, 2005; MARUYAMA; MAKI; MORI, 1993; NAKASHIMA et al., 1995; PEUNGSUNGWAL et al., 2001; ROCHA; SIQUEIRA, 2004; RUAUX, 1995; SANTAMARÍA et al., 1997; SAWADA et al., 1991; SOUZA et al., 2004; TANAKA et al., 1998).

Algumas das soluções adotadas por esses autores são baseadas na utilização de robôs na forma de *trolley*, diferentemente da solução apresentada em (ROCHA; SIQUEIRA, 2004), em que na ausência de obstáculos o robô se movimentaria de forma semelhante ao movimento dos anelídeos; já quando houvesse algum obstáculo o robô (apresentado na Figura 2) se movimenta por bracejamento, isto é, um braço para servir de sustentáculo ao robô e o outro braço para transpor o obstáculo, alcançando o cabo novamente.

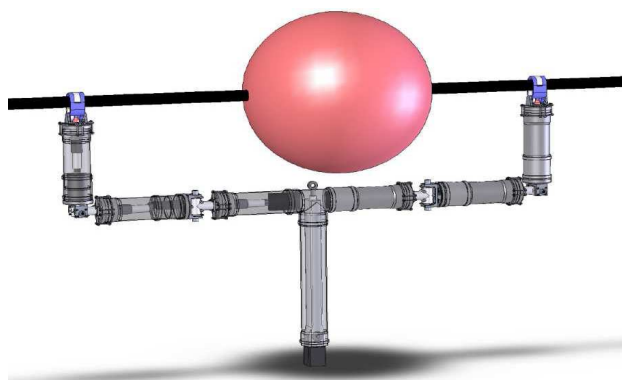


Figura 2: Robô anelídeo.

No início da década passada, uma nova classe de robô móvel foi proposta por Fukuda em (FUKUDA; HOSOKAL; KONDO, 1991), o qual procurava imitar o modo como um macaco se movimenta, balançando de um galho a outro (veja Figura 3), fazendo uso efetivo da força gravitacional. Nesse trabalho foi apresentado um robô com seis elos e cinco atuadores, como pode ser visto na Figura 4(a). O trabalho de Bertram (BERTRAM, 2005) se coloca como uma boa referência sobre esse tipo de movimento.

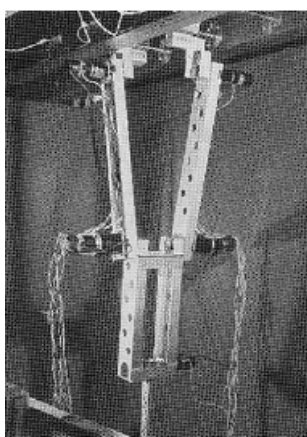
De modo geral os macacos <sup>1</sup> se movimentam utilizando bracejamento lento, com velocidade aproximada à velocidade de uma pessoa caminhando. Entretanto, quando em situação de acoamento, os animais podem se deslocar em velocidades elevadas, chegando a se deslocar 10m (30ft) em um único movimento (bracejamento rápido ou ricocheteamento) (EIMERL; DEVORE, 1966).

O movimento de bracejamento envolve três diferentes variantes, a saber:

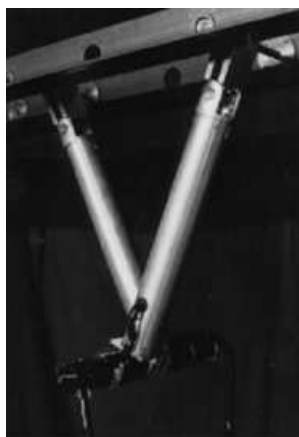
<sup>1</sup>O movimento de bracejamento é uma forma de locomoção utilizada exclusivamente por macacos.



Figura 3: Um macaco realizando bracejamento.



(a) BrachiatorI



(b) BrachiatorII



(c) BrachiatorIII

Figura 4: Protótipos construídos no laboratório do Prof. Fukuda – Univerdade de Nagoya.

- movimento de *swing-up* e *ladder*
- movimento de *rope*
- movimento de *leap*

O primeiro movimento (*swing-up*) acontece quando um macaco se desloca de um galho para outro e o controle da posição do braço para segurar o próximo galho é o requisito principal da tarefa de deslocamento, como ilustrado na Figura 5.

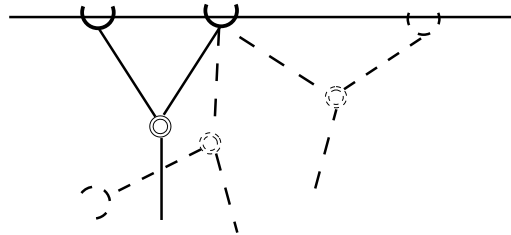


Figura 5: Movimento de bracejamento único (*swing-up brachiation*).

Já o segundo movimento (*rope*), apresentado na Figura 6, acontece quando o macaco realiza o movimento de bracejamento de modo contínuo, isto é, executa vários movimentos de troca de galho.

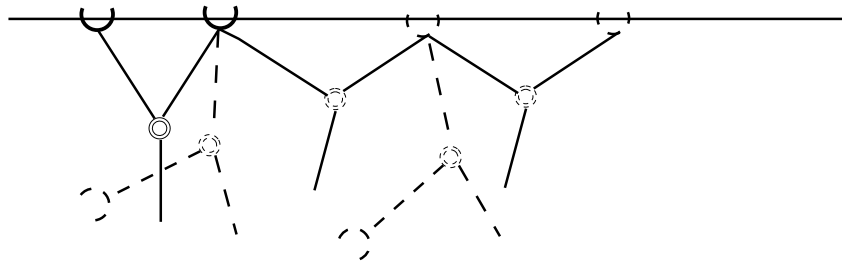


Figura 6: Movimento de bracejamento contínuo (*rope brachiation*).

Por fim, o terceiro modo de bracejamento (*leap*) ocorre quando o próximo galho está fora do alcance do macaco, ou seja, se encontra a uma distância maior que a sua envergadura. Para conseguir alcançar o galho, há a necessidade de uma velocidade inicial e de uma fase de vôo livre, em que o macaco fica com os dois braços soltos, como pode ser observado na Figura 7.

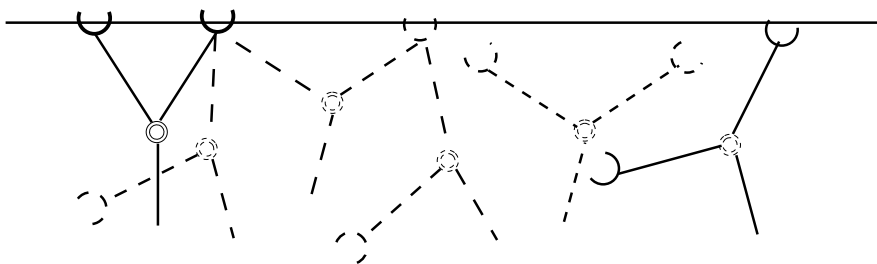


Figura 7: Movimento de bracejamento rápido (*ricochetal brachiation*).

Os primeiros trabalhos introduzindo o problema de controle de robôs bracejadores são (SAITO; FUKUDA; ARAI, 1993, 1994), os quais consideram um robô bracejador

simples, com dois elos. Nesses trabalhos, foi proposto um método de aprendizado heurístico para a geração de trajetórias realizáveis pelo robô.

Há vários trabalhos de pesquisa a respeito de robôs bracejadores na literatura técnica. Fukuda, Hosaki e Kondo (FUKUDA; HOSOKAL; KONDO, 1991) desenvolveram um robô bracejador com dois elos, apresentado na Figura 4(b), que é um sistema mecânico subatuado com dois graus de liberdade e somente um atuador, similar ao Acrobot (SPONG, 1995).

Fukuda, Hasegawa, Shimojima e Saito desenvolveram um algoritmo de aprendizado por reforço auto-ajustável para gerar trajetórias realizáveis e que apresentam propriedades de robustez a algumas perturbações. Dando continuidade Saito incluiu um controle por realimentação para incrementar aspectos de robustez do sistema de controle (HASEGAWA; FUKUDA; SHIMOJIMA, 1999; HASEGAWA et al., 1996). Todos esses trabalhos não consideram o uso de modelo matemático para a dinâmica do robô durante o processo de aprendizagem. A principal desvantagem de tal metodologia é a necessidade de um longo período de treinamento (em torno de 200 experimentos com o robô físico) para cada configuração do robô, a fim de se realizar com sucesso o movimento, considerando a mesma distância entre pontos de apoio.

Nakanishi, Fukuda e Koditschek propuseram uma abordagem diferente, considerando uma dinâmica alvo para o controle de sistemas subatuados, abordagem essa que se apresenta como uma variante das técnicas padrão para inversão de planta (NAKANISHI; FUKUDA; KODITSCHEK, 2000). Os autores utilizaram uma abordagem inspirada na biomecânica, definindo a tarefa dinâmica a partir de uma dinâmica alvo mais simples (de menor dimensão) e com uso sistemático de simetria temporal reversa. Entretanto, uma das desvantagens dessa estratégia é a necessidade de um modelo matemático preciso para a dinâmica do robô.

Na seqüência dos trabalhos, Hasegawa e Fukuda propuseram um robô bracejador com sete elos, mostrado na Figura 4(c). Esse robô é um sistema redundante, capaz de executar movimentos complexos da mesma maneira que um macaco real, considerando a realização do movimento em um plano bi-dimensional (HASEGAWA; FUKUDA, 1999, 2004). Nesse trabalho os autores introduziram uma arquitetura de controle para tratar com múltiplas variáveis de entrada e saída. A abordagem baseada em comportamento facilita o processo de projeto, reduzindo o número de graus de liberdade ( $n_{GL}$ ) a ser considerado, utilizando, para tanto, a decomposição em comportamentos simples e coordenando as ações entre os vários comportamentos. A principal desvantagem dessa estratégia é a dificuldade em se ajustar o controlador quando há alguma alteração no ambiente ou alguma mudança no movimento a ser executado.

Durante os últimos anos, vários trabalhos desenvolvidos têm por objetivo principal o estudo de movimento dinâmico realizado por animais, mas considerando somente o único tipo de locomoção, como bípede ou quadrúpede (AZEVEDO; POIGNET; ESPIAU, 2004; MCGEERN, 1990). Recentemente, Fukuda e Hasegawa apresentaram o conceito de robô para multilocomoção, que pode ser melhor entendida pela Figura 8, denominado Gorilla III, apresentado na Figura 9, o qual é capaz de executar diferentes tipos de locomoção: por bracejamento, bípede e quadrúpede. É importante salientar que, embora o sistema mecânico seja capaz de realizar os diferentes modos de locomoção, quando se trata do movimento de bracejamento, as várias estratégias de controle desenvolvidas e empregadas não possuem a capacidade de controlar tanto o bracejamento por *under-swing* (movimentação dos braços por baixo do tronco) quanto o bracejamento por *over-hand* (movimentação dos braços por cima da cabeça).

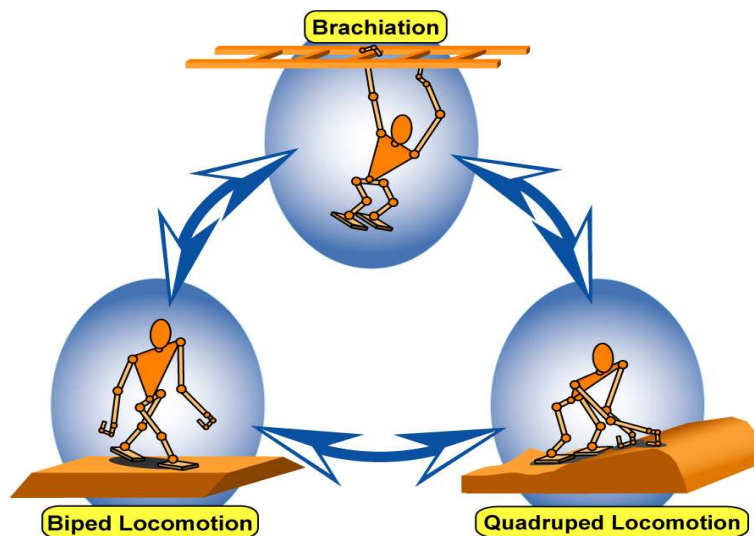


Figura 8: Conceito de robô multilocomoção.

Em (KAJIMA et al., 2003) é apresentada uma estratégia para o controle do robô multilocomoção para se locomover por meio de bracejamento, baseada na abordagem de controle de comportamento local previamente desenvolvida pelos autores. Uma outra estratégia, baseada em controle de energia para a fase de balanço do bracejamento, é apresentada em (KAJIMA et al., 2005, 2006), em que um modelo simplificado de quatro elos é empregado para representar a dinâmica do robô multilocomoção. O objetivo é injetar a mínima quantidade de energia no robô durante as fases de balanço e deslocamento.

Em (KOJIMA et al., 2007) apresenta-se uma nova estratégia para controle do movimento de bracejamento, considerando intervalos irregulares das barras de sustentação, baseada em *Passive Dynamic Autonomous Control (PDAC)*, previamente empregada no controle de locomoção bípede (caminhar) (DOI; HASEGAWA; FUKUDA, 2004). A idéia central é desenvolver um método energeticamente eficiente que permite atingir uma amplitude suficiente durante a fase de locomoção utilizando PDAC na dinâmica do robô.

A partir da segunda metade do século passado, com o crescente avanço das tecnologias de automação industrial, tem sido cada vez maior a atenção dispensada ao controle automático de sistemas mecânicos. Na sua quase totalidade, os trabalhos desenvolvidos consideram sistemas completamente atuados, ou seja, sistemas que apresentam uma entrada independente de controle para cada grau de liberdade, igual à dimensão do espaço de configuração.

Durante esse período, várias técnicas de controle têm sido desenvolvidas como controle robusto, controle ótimo, controle adaptativo, controle não-linear, controle inteligente. Tais técnicas podem ser utilizadas para sistemas completamente atuados, pois estes apresentam características importantes tais como possibilidade de linearização por realimentação e passividade.

## 1.1 Sistemas Mecânicos Subatuados

Essa classe de sistemas mecânicos caracteriza-se pelo fato de os sistemas possuírem um número de entradas de controle menor que o número de graus de liberdade ( $m < n_{GL}$ ) e apresentam-se como interessantes problemas do ponto de vista de controle e, ao longo



Figura 9: Robô Gorilla III.

das últimas duas décadas, têm recebido grande destaque por parte dos pesquisadores. Várias são as aplicações reais em que se encontra a utilização de sistemas subatuados, como sistemas aeroespaciais, sistemas flexíveis e sistemas móveis. Exemplos de robôs manipuladores subatuados são o ACROBOT (SPONG, 1995), o PENDUBOT (SPONG; BLOCK, 1995) e o VSTOL (HAUSER; SASTRY; MEYER, 1992).

O modelo dinâmico de um sistema mecânico subatuado é praticamente igual ao modelo de um sistema completamente atuado, exceto pelo fato de a matriz de seleção das entradas de controle  $\mathbf{B}$  não possuir *rank* completo, isto é, a matriz é não invertível, o que inviabiliza a linearização completa por realimentação de estados. Tal característica deve-se ao fato de o número de entradas independentes de controle ser menor que o número de graus de liberdade do sistema.

A característica (ou propriedade) de subatuação se deve a, pelo menos, uma das três razões a seguir:

1. dinâmica do sistema;
2. requisitos de projeto (para redução de custo ou por aspectos práticos);
3. eventual falha em um atuador;

**Definição 1.1** *Denomina-se grau de liberdade ativo o grau de liberdade que tenha associado diretamente a ele uma entrada externa de controle.*

**Definição 1.2** *Denomina-se grau de liberdade passivo o grau de liberdade que não tenha associado diretamente a ele uma entrada externa de controle.*

Uma propriedade comum a todos os sistemas subatuados é a propriedade da linearização parcial colocada por realimentação (SPONG, 1995), que consiste em aplicar um controle que linearize as equações associadas com os graus de liberdade ativos (os quais estão diretamente associados a uma entrada externa de controle). Já a propriedade de



linearização parcial não-colocada por realimentação consiste em linearizar as equações referentes aos graus de liberdade passivos (os quais não estão diretamente associados a uma entrada externa de controle), desde que a matriz de inércia apresente acoplamento inercial (SPONG, 1997). Obviamente esta última propriedade não se aplica a toda a classe de sistemas subatuados.

Uma classe ainda mais especializada de sistemas mecânicos subatuados é aquela em que o número de variáveis atuadas é menor que o número de variáveis não-atuadas, ou seja,  $n_{GL} - m > m$ . Tais sistemas são chamados de Sistemas Subatuados de Alta Ordem.

## 1.2 Restrições Não-holonômicas de Segunda Ordem

### Definição 1.3 *Sistemas Holonômicos*

Considere um sistema com coordenadas generalizadas  $q$

$$\ddot{q} = f(q, \dot{q}, u) \quad (1)$$

onde  $f(\cdot)$  é o campo vetorial da dinâmica e  $u$  o vetor das entradas externas generalizadas. Suponha que o movimento do sistema esteja limitado por alguma alguma restrição. Se as condições da restrição podem ser expressas por meio de equações que envolvam as coordenadas generalizadas (e, possivelmente, a variável tempo) na forma:

$$\alpha(q, t) = 0 \quad (2)$$

então as restrições são ditas **holonômicas**. Esse tipo de restrição pode ser integrada.

### Definição 1.4 *Sistemas Não-holonômicos*

Considerando o sistema (1), quando não for possível representar as restrições na forma dada pela expressão (2), diz-se que as restrições são **não-holonômicas**. Em sistemas não-holonômicos, as coordenadas generalizadas não são independentes entre si.

Diversos sistemas mecânicos subatuados estão sujeitos a restrições não-holonômicas. Mais especificamente, as restrições não-holonômicas dividem-se em duas classes distintas (ANEKE, 2003): restrições não-holonômicas de primeira ordem e restrições não-holonômicas de segunda ordem.

### Definição 1.5 *Restrições Não-holonômicas de Primeira Ordem*

Restrições não-holonômicas de primeira ordem são restrições que envolvem somente as coordenadas generalizadas de posição e velocidade, sob a forma  $\alpha(q, \dot{q}) = 0$ .

### Definição 1.6 *Restrições Não-holonômicas de Segunda Ordem*

Restrições não-holonômicas de segunda ordem são restrições que envolvem as coordenadas generalizadas de posição, velocidade e aceleração, sob a forma  $\alpha(q, \dot{q}, \ddot{q}) = 0$ .

Restrições não-holonômicas de primeira ordem, comumente referenciadas por restrições não-holonômicas de velocidade, são definidas como sendo restrições nas coordenadas e velocidades generalizadas sob a forma  $\alpha(q, \dot{q}) = 0$ . Um exemplo de sistema mecânico sujeito a restrição não-holonômica é o robô móvel com atuação diferencial (OLIVEIRA, 2001). Já as restrições não-holonômicas de segunda ordem, também chamadas

de restrições de aceleração, são definidas como sendo restrições nas coordenadas, velocidades e acelerações generalizadas, sob a forma  $\alpha(q, \dot{q}, \ddot{q}) = 0$ . Navios, veículos subaquáticos, espaçonaves, robôs espaciais e robôs manipuladores subatuados são exemplos de sistemas mecânicos que apresentam restrições não-holonômicas de segunda ordem.

Considere um sistema mecânico sujeito a uma restrição diferencial de segunda ordem do tipo:

$$f(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) = 0 \quad (3)$$

Se essa restrição puder ser integrada completamente como uma restrição da forma  $g(q, t) = 0$ , então a restrição é dita holonômica, caso contrário ela é não-holonômica.

O interesse em sistemas mecânicos sujeitos a restrições não-holonômicas de segunda ordem dá-se pelo fato de tais sistemas não serem estabilizáveis por meio de realimentação contínua (ou suave) invariante no tempo, não satisfazendo as condições apresentadas por (BROCKETT, 1981). Além disso, sistemas subatuados sob restrições não-holonômicas apresentam-se como um desafiante problema do ponto de vista de controle, com vários aspectos ainda em aberto, por exemplo, em que condições o problema de rastreamento de trajetória pode ser resolvido por uma realimentação invariante no tempo.

Classificar uma restrição em holonômica ou não-holonômica é importante para o controle de sistemas mecânicos subatuados. Como se sabe, é impossível estabilizar assintoticamente em um estado de equilíbrio, mesmo localmente, sistemas subatuados sujeitos a restrições não-holonômicas de segunda ordem por meio de uma realimentação suave invariante no tempo.

Assim, faz-se necessário estabelecer condições de integrabilidade. Algumas condições, como o Teorema da Integral Exata e o Teorema da Restrição Diferencial Integrável, não são facilmente aplicadas a restrições diferenciais. Dois resultados a respeito de classificação de restrições holonômicas e não-holonômicas são apresentados em (ORIOLO; NAKAMURA, 1991) e (WICHLUND; SORDALEN; EGELAND, 1995).

### 1.2.1 Condições de Integrabilidade

Uma abordagem comum em relação a sistemas não-holonômicos é inferir a natureza não-holonômica das restrições a partir da acessibilidade do sistema. Entretanto, esse procedimento não pode ser aplicado a sistemas subatuados (ORIOLO; NAKAMURA, 1991).

O trabalho de Oriolo e Nakamura estabelece condições de integrabilidade utilizando o padrão da restrição (3), que depende da estrutura do modelo dinâmico.

#### **Teorema 1.1 Oriolo & Nakamura**

*Considere um sistema mecânico com sua dinâmica sujeita a restrições do tipo da Equação (3). A restrição será parcialmente integrável se:*

- a) o torque gravitacional for constante;*
- b) as variáveis de junta não-atuadas não aparecerem na matriz de inércia da dinâmica do sistema.*

*Ainda, a restrição será completamente integrável (holonômica) se:*

- i) for parcialmente integrável*
- ii) a distribuição  $\Delta : H_u(q)\dot{q} = 0$  for involutiva.*

A prova desse teorema pode ser encontrada em (ORIOLO; NAKAMURA, 1991).

Wichlund apresenta em (WICHLUND; SORDALEN; EGELAND, 1995) uma análise semelhante, considerando as coordenadas generalizadas descritas em relação a um sistema móvel de coordenadas ao invés de um sistema fixo de coordenadas.

Novas condições de integrabilidade utilizando o Teorema de Frobenius, na forma diferencial, são apresentadas em (TARN; ZHANG; SERRANI, 2003). As condições são independentes de coordenada e, em geral, podem ser aplicadas a restrições diferenciais de qualquer ordem.

### **Teorema 1.2 Teorema de Frobenius**

Seja  $(\omega_{p+1}, \omega_{p+2}, \dots, \omega_n)$  um sistema de  $(n - p)$  formas diferenciais de grau 1, pertencentes à classe  $\mathcal{C}^1$ , em um conjunto aberto  $\mathcal{U} \in \mathcal{R}$ , tal que em cada ponto  $x \in \mathcal{U}$  o rank do sistema seja igual a  $(n - p)$ .

O sistema diferencial  $\omega_i = 0$  ( $p + 1 \leq i \leq n$ ) é completamente integrável se, e somente se, as formas diferenciais

$$d\omega_i \wedge \omega_{p+1} \wedge \omega_{p+2} \wedge \dots \wedge \omega_n \quad (p + 1 \leq i \leq n)$$

se anularem identicamente.

Em outras palavras, uma restrição diferencial de segunda ordem é completamente integrável se, e somente se, o produto exterior (*wedge product*) de  $\omega$  e  $d\omega$  for nulo, onde  $\omega$  é a restrição na forma diferencial. Em (ZHANG; TARN, 2003) apresenta-se a prova completa para esse teorema.

## **1.3 Contribuição do Trabalho**

O foco principal deste trabalho é o desenvolvimento de uma estratégia de controle em malha fechada para um sistema mecânico não-linear subatuado sujeito a restrições não-holonômicas de segunda ordem.

A principal contribuição desse trabalho, mais especificamente, é a proposição de um esquema de controle em malha fechada que seja capaz de levar em consideração, de modo direto e simples, tanto a característica de subatuação quanto as restrições impostas ao sistema a ser controlado. Essa estratégia de controle deve gerar um sinal de controle capaz de movimentar o robô bracejador de modo contínuo ao longo da linha horizontal de sustentação.

A análise das restrições é outra abordagem importante deste trabalho, caracterizando as restrições de segunda ordem (restrições de aceleração) como restrições não-holonômicas.

Vários são os esquemas de controle já aplicados ao controle de robôs bracejadores que apresentam resultados práticos bastante interessantes. Entretanto, tais esquemas de controle apresentam-se pouco flexíveis quando diante de modificações no objetivo de controle ou mesmo alterações nas restrições impostas ao sistema a ser controlado.

Assim, com a perspectiva de se apresentar uma estratégia de controle para robôs bracejadores que tenha a capacidade de tratar de maneira direta a característica de subatuação inerente a esse tipo de robô e, além disso, seja capaz de considerar as restrições impostas ao sistema, apresenta-se a estratégia de controle preditivo baseado em modelo (MPC) (OLIVEIRA; LAGES, 2006a,b, 2007a).

O esquema de controle MPC aplicado ao controle de robôs bracejadores apresenta, como pode ser visto ao longo desse trabalho, resultados bastante motivadores. As restrições impostas ao sistema são tratadas de maneira direta pelo esquema de controle e a

característica de subatuação é tratada de maneira implícita pelo procedimento de otimização existente no MPC.

Além de conseguir fazer com que o robô realize o movimento completo de bracejamento, o esquema de controle proposto neste trabalho é capaz de realizar o movimento de bracejamento de duas maneiras: bracejamento por *under-swing* e bracejamento por *over hand*.

Um dos grandes problemas da estratégia de controle MPC é o grande custo computacional devido à solução do problema de otimização não-linear. Os resultados obtidos utilizando-se um modelo não-linear mostram que o tempo requerido para a obtenção do sinal de controle é excessivamente longo, não permitindo sua aplicação em tempo-real, com uma implementação em *software* nos computadores disponíveis hoje. A maneira utilizada para se transpor essa dificuldade consiste em se obter um modelo linearizado para prever o comportamento do sistema durante o horizonte de predição, transformando o problema de otimização não-linear em um problema de otimização linear, o qual pode ser resolvido de maneira mais rápida e eficiente. Os resultados obtidos validam essa abordagem, de tal sorte que os tempos de execução foram substancialmente menores.

O trabalho desenvolvido neste projeto de pesquisa está inserido em um projeto maior, que tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de um robô manipulador móvel por bracejamento, capaz de realizar movimento contínuo ao longo de linhas aéreas de transmissão de energia, visando a sua posterior utilização nas tarefas de inspeção de cabos e isoladores. Um esboço da configuração mecânica do robô em desenvolvimento pode ser visualizado na Figura 10. O robô é constituído por dois braços e um corpo, totalizando três elos.

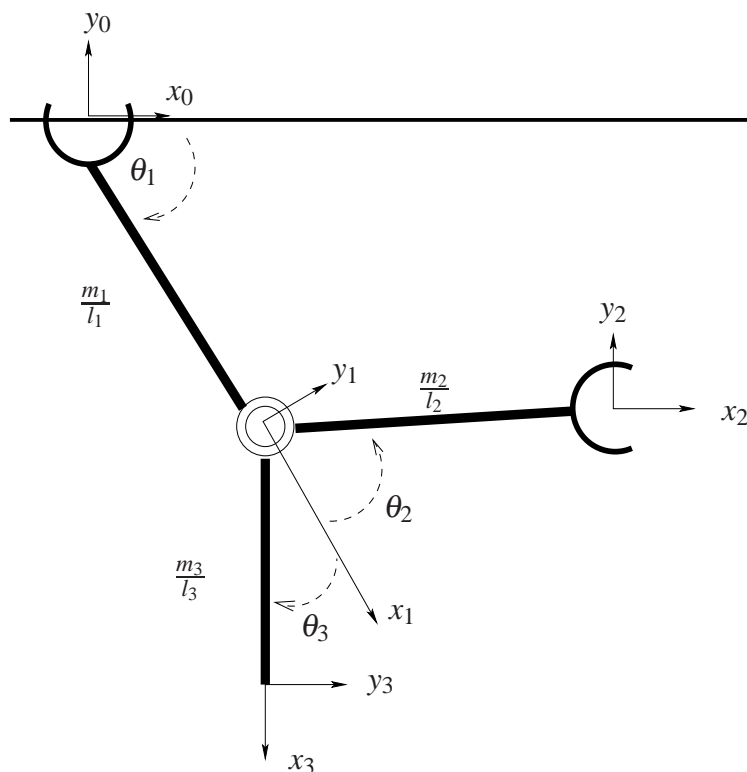


Figura 10: Robô braçador considerado no trabalho.

## 1.4 Organização do Texto

O Capítulo 2 apresenta o desenvolvimento matemático dos modelos que descrevem a cinemática, utilizando uma extensão da convenção de *Denavit-Hartenberg*, e a dinâmica do sistema, utilizando o método de Euler-Lagrange, para o robô bracejador com três graus de liberdade e duas entradas independentes de controle mostrado na Figura 10.

Em seguida, no Capítulo 3, são discutidas diversas estratégias de controle utilizadas para o controle de sistemas mecânicos subatuados e, de maneira mais detalhada, estratégias de controle para robôs bracejadores.

Já no Capítulo 4, especial atenção é dispensada à técnica de controle preditivo baseado em modelo, tanto considerando modelo não-linear quanto modelo linearizado. Além disso, discute-se a questão da estabilidade dessa estratégia de controle.

As simulações implementadas e os respectivos resultados obtidos são apresentados no Capítulo 5. Apresentam-se sete diferentes simulações, buscando mostrar diversas situações interessantes: modelo não-linear e modelo linearizado, movimento com ponto de referência e trajetória de referência, diferentes tipos de bracejamento (*underswing* e *overhand*), além de simulações em tempo real para validar a viabilidade da estratégia de controle proposta no trabalho.

Por fim, no Capítulo 6, são expostas algumas conclusões a respeito do trabalho desenvolvido e diversas possibilidades de estudos futuros como continuidade deste projeto.



## 2 MODELOS DINÂMICO E CINEMÁTICO DE SISTEMAS MECÂNICOS

Neste capítulo serão introduzidos os métodos de Denavit-Hartenberg (D-H) e de Euler-Lagrange (E-L) para o desenvolvimento de modelos matemáticos para a cinemática e dinâmica, respectivamente.

### 2.1 Modelo Cinemático Direto

Para o desenvolvimento do modelo cinemático direto utilizou-se a convenção de Denavit-Hartenberg (FU; GONZALES; LEE, 1987; SCIAVICCO; SICILIANO, 1996), como mostrada na figura 11, sendo resumidamente apresentada a seguir:

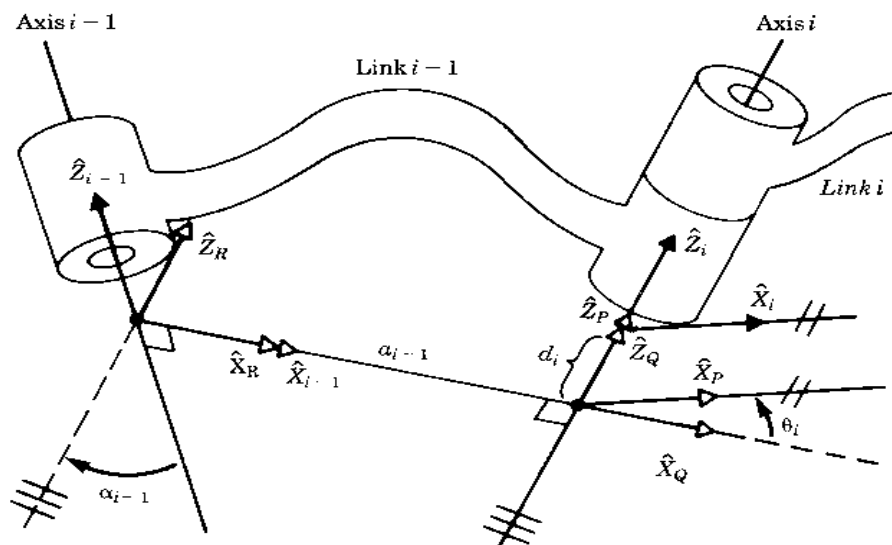


Figura 11: Definição dos parâmetros de D-H.

1. *Sistema de coordenadas da base.* Estabeleça o sistema de coordenadas da base  $(x_0, y_0, z_0)$  na base de apoio do robô, com o eixo  $z_0$  sobre o eixo da junta 1 apontando para o "ombro" do robô. Os eixos  $x_0$  e  $y_0$  podem ser convenientemente estabelecidos, desde que formando um sistema ortonormal.
2. *Sistemas de coordenadas das juntas.* Para cada uma das juntas  $i = 1 \dots n - 1$ , repita:

- (a) *Eixo da junta.* Alinhe  $z_i$  com o eixo da junta  $i + 1$  (rotacional ou prismática).
- (b) *Origem do sistema  $i$ .* Localize a origem do sistema  $i$  na intersecção de  $z_i$  e  $z_{i-1}$  ou na intersecção da normal comum a  $z_i$  e  $z_{i-1}$  e o eixo  $z_i$ .
- (c) *Eixo  $x_i$ .*  $x_i = \pm(z_{i-1} \times z_i) / \|z_{i-1} \times z_i\|$  ou sobre a normal comum entre  $z_{i-1}$  e  $z_i$  se eles forem paralelos.
- (d) *Eixo  $y_i$ .*  $y_i = +(z_i \times x_i) / \|z_i \times x_i\|$ , para completar o sistema.
3. *Sistema de coordenadas da garra.* Usualmente a  $n$ -ésima junta é rotacional. Alinhe  $z_n$  na mesma direção que  $z_{n-1}$  e apontando para fora do robô. Alinhe  $x_n$  de forma que seja normal a  $z_{n-1}$  e a  $z_n$ .  $y_n$  completa o sistema.
4. *Parâmetros das juntas e elos.* Para cada  $i = 1 \dots n$  repita:
- (a)  $d_i$ .  $d_i$  é a distância da origem do sistema  $i - 1$  à intersecção dos eixos  $z_{i-1}$  e  $x_i$ , medida sobre o eixo  $z_{i-1}$ . É a variável de junta, se a junta  $i$  for prismática.
- (b)  $a_i$ .  $a_i$  é a distância da intersecção de  $z_{i-1}$  e  $x_i$  à origem do sistema  $i$ , medida sobre o eixo  $x_i$ .
- (c)  $\theta_i$ .  $\theta_i$  é o ângulo de rotação em torno de  $z_{i-1}$ , medido de  $x_{i-1}$  a  $x_i$ . É a variável de junta se a junta  $i$  for rotacional.
- (d)  $\alpha_i$ .  $\alpha_i$  é o ângulo de rotação em torno de  $x_i$ , medido de  $z_{i-1}$  a  $z_i$ .

De acordo com o procedimento apresentado, os sistemas de coordenadas para o robô bracejador são mostrados na Figura 10 e os parâmetros estão definidos conforme a tabela 1:

Tabela 1: Tabela com os parâmetros da convenção D-H.

Elo	$a_i$	$d_i$	$\theta_i$	$\alpha_i$
1	$l_1$	0	$\theta_1$	0
2	$l_2$	0	$\theta_2$	0
3	$l_3$	0	$\theta_3$	0

Para a configuração utilizada, as matrizes de transformação homogênea são dadas por:

$$\begin{aligned}
 {}^0\mathbf{T}_1 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & l_1\cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & l_1\sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^1\mathbf{T}_2 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & l_2\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & l_2\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^1\mathbf{T}_3 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & l_3\cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & l_3\sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$



## 2.2 Modelo Dinâmico

Nesta Seção considera-se o método de Euler-Lagrange, baseado na energia envolvida no sistema, para modelagem dinâmica de sistemas mecânicos, além de destacar importantes características como atuação completa (subatuação), holonomicidade (não-holonomicidade), simetria e momento. Também são discutidos aspectos relacionados à representação de tais sistemas de forma adequada ao controle (formas normais).

### 2.2.1 Equações de Euler-Lagrange

Um sistema mecânico simples é um sistema em que seu Lagrangeano  $\mathcal{L}$  é dado pela diferença entre a sua energia cinética  $E_c$  e a sua energia potencial  $E_p$ , expresso por:

$$\mathcal{L}(q, \dot{q}) = E_c - E_p = \frac{1}{2} \dot{q}^T \mathbf{M}(q) \dot{q} - E_p(q) \quad (4)$$

onde  $q \in Q$  é o vetor de configuração pertencente ao *manifold*  $n$ -dimensional  $Q$ ,  $\mathbf{M}(q)$  é a matriz de inércia simétrica definida positiva.

As equações de movimento para este sistema mecânico são dadas por:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} = \mathbf{B}(q)u \quad (5)$$

onde  $u \in \mathcal{R}^m$  são as entradas externas de controle e  $\mathbf{B}(q) = (b_1(q), \dots, b_m(q))$  a matriz de acoplamento das entradas.

Aplicando (5) e rearranjando as equações na forma matricial, a dinâmica do sistema mecânico pode ser apresentada como:

$$\mathbf{M}(q)\ddot{q} + \mathbf{V}(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \mathbf{B}(q)u - f_v \quad (6)$$

onde  $G(q) \in \mathcal{R}^n$  é o vetor com os termos gravitacionais e  $\mathbf{V}(q, \dot{q}) \in \mathcal{R}^{n \times n}$  é uma matriz envolvendo dois tipos de termos  $\dot{q}_i \dot{q}_j$ , chamados termos centrífugos ( $i = j$ ) e termos de Coriolis ( $i \neq j$ ).

Uma interessante relação entre as matrizes  $\mathbf{M}(q)$  e  $\mathbf{V}(q, \dot{q})$  é que:

$$\mathbf{W} = \dot{\mathbf{M}}(q) - 2\mathbf{V}(q, \dot{q}) \quad (7)$$

é uma matriz anti-simétrica, isto é,  $\dot{\mathbf{M}}(q) = \mathbf{V}(q, \dot{q}) + \mathbf{V}^T(q, \dot{q})$ .

### 2.2.2 Forma Normal de Legendre

Considerando a propriedade de anti-simetria (7) e que  $\mathbf{M}(q)$  é uma matriz simétrica definida positiva, a forma normal de Legendre em relação a  $\dot{q}$  é dada por:

$$p \triangleq \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} = \mathbf{M}(q)\dot{q} \quad (8)$$

e a dinâmica do sistema mecânico pode ser reescrita na forma canônica:

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \mathbf{M}^{-1}(q)p \\ \dot{p} &= -G(q) + \mathbf{V}^T(q, \mathbf{M}^{-1}(q)p)\mathbf{M}^{-1}(q)p + \mathbf{B}(q)u \end{aligned} \quad (9)$$

Definindo  $x_1 \triangleq q$  e  $x_2 \triangleq p$  e substituindo em (9) resulta em :

$$\dot{q} = f(x) + g(x)u \quad (10)$$

onde  $x = \text{col}(x_1, x_2)$  e os campos vetoriais  $f(x)$  e  $g(x)$  são dados por:

$$f(x) \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{M}^{-1}(x_1)x_2 \\ -G(x_1) + x_2^T \mathbf{Q}(x_1)x_2 \end{bmatrix}$$

e

$$g(x) \triangleq \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B}(x_1) \end{bmatrix}$$

A equação (10) representa um sistema não-linear afim e a principal vantagem é a disponibilidade de procedimentos analíticos para a análise de controlabilidade e observabilidade e para o projeto de leis de controle para sistemas representados sob essa forma (ISIDORI, 1989; MAHINDRAKAR; BANAVAR, 2002; SLOTINE; LI, 1991).

### 2.2.3 Simetria

O Lagrangeano do sistema mecânico é simétrico em relação à variável de configuração  $q_i$  se, e somente se:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = 0, \quad i \in \{1, \dots, n\} \quad (11)$$

Uma outra caracterização similar de simetria é considerar a invariância da energia cinética do sistema, em vez do Lagrangeano, em relação a uma variável de configuração  $q_i$ .

### 2.2.4 Sistemas Mecânicos Totalmente Atuados

**Definição 2.1** Um sistema mecânico é dito *totalmente atuado* se

$$m = \text{rank}(\mathbf{B}(q)) = n_{GL} \quad (12)$$

Essa definição diz, de maneira indireta, que um sistema é totalmente atuado se a matriz  $\mathbf{B}(q)$  for invertível, caracterizando que o número de entradas independentes de controle é igual ao número de graus de liberdade do sistema.

Uma importante característica de sistemas mecânicos totalmente atuados é a possibilidade de linearização exata por meio de realimentação de estado. Considere a seguinte lei de controle aplicada ao sistema (6):

$$u = \mathbf{B}^{-1}(q)(\mathbf{M}(q)v + \mathbf{V}(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)) \quad (13)$$

e redefinindo  $x_1 \triangleq q$  e  $x_2 \triangleq \dot{q}$ , obtém-se

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= v \end{aligned}$$

que é um modelo linear.

Para as condições necessárias à aplicação de linearização por realimentação em sistemas não-lineares genéricas vide (ISIDORI, 1989; SLOTINE; LI, 1991).

### 2.2.5 Sistemas Mecânicos Subatuados

Uma definição informal para sistemas mecânicos subatuados bastante razoável é se o número de entradas de controle for menor que o número de variáveis de junta. Agora, de modo formal tem-se (FANTONI; LOZANO, 2002):

**Definição 2.2** *Considere um sistema cuja dinâmica possa ser expressa sob a forma:*

$$\ddot{q} = f(q, \dot{q}) + \mathbf{B}(q)u \quad (14)$$

sendo  $q$  o vetor de coordenadas generalizadas e  $\dim(q)$  o número de graus de liberdade do sistema.  $f(\cdot)$  é o campo vetorial representando a dinâmica do sistema,  $\dot{q}$  é o vetor de velocidades generalizadas,  $\mathbf{B}(q)$  a matriz de seleção das entradas e  $u$  o vetor de forças generalizadas de controle.

Tal sistema é caracterizado como **subatuado** se as forças generalizadas de controle não forem capazes de comandar aceleração instantânea em todas as direções do espaço de configuração:

$$\text{rank}(\mathbf{B}(q)) = \dim(q) \quad (15)$$

Outra possível definição para sistemas mecânicos subatuados é que o número de entradas externas de controle seja menor que o número de coordenadas generalizadas a serem controladas.

Essa restrição nas entradas de controle faz com que não seja mais possível a linearização exata do sistema, sendo possível somente uma linearização parcial. A linearização parcial pode ser feita de duas formas, a saber: linearização parcial colocada e linearização parcial não-colocada (SPONG, 1995).

**Definição 2.3 Variável de Forma** *Toda variável de configuração  $q_i \in q$  que esteja presente na matriz de inércia do sistema, isto é:*

$$\frac{\partial \mathbf{M}(q)}{\partial q_i} \neq 0 \quad (16)$$

é denominada **variável de forma**.

**Definição 2.4 Variável Externa** *Toda variável de configuração  $q_i \in q$  que não esteja presente na matriz de inércia do sistema, isto é:*

$$\frac{\partial \mathbf{M}(q)}{\partial q_i} = 0 \quad (17)$$

é denominada **variável externa**.

## 2.3 Linearização Parcial

Segundo Spong (SPONG, 1995), mesmo não sendo possível realizar a linearização total de um sistema subatuado, é possível se obter, por meio de uma realimentação não-linear adequada, um comportamento linear para parte dos graus de liberdade do sistema.

Uma característica comum em diversas abordagens para controle de sistemas subatuados é considerar o modelo dinâmico particionado entre coordenadas generalizadas ativas

$q_a$  (aquelas diretamente atuadas pelas entradas de controle) e coordenadas generalizadas passivas  $q_p$  (sem atuação direta), expresso genericamente por:

$$\begin{bmatrix} m_{aa} & m_{pa}^T \\ m_{pa} & m_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_a \\ \ddot{q}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_a \\ g_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$m_{ap}(q)\ddot{q}_p + m_{aa}(q)\ddot{q}_a + v_a(q, \dot{q}) + g_a(q) = \tau \quad (19)$$

$$m_{pp}(q)\ddot{q}_p + m_{pa}(q)\ddot{q}_a + v_p(q, \dot{q}) + g_p(q) = 0 \quad (20)$$

Segundo Spong (SPONG, 1998), uma interessante propriedade da classe de sistemas subatuados é a linearização parcial por realimentação de estado. Essa linearização parcial pode ocorrer de duas maneiras: linearização parcial colocada e linearização parcial não-colocada.

Linearização parcial colocada se refere à lei de controle que lineariza as equações diretamente relacionadas às coordenadas generalizadas ativas  $q_a$ . Tal linearização é equivalente à linearização entrada-saída, considerando que a saída do sistema é dada por  $y = q_a$ . Essa propriedade se verifica para todos os sistemas pertencentes à classe de sistemas subatuados.

Por sua vez, a linearização parcial não-colocada diz respeito à linearização das equações associadas às coordenadas generalizadas passivas, sendo possível somente se o sistema for fortemente inercialmente acoplado (*strongly inertially coupled*), isto é:

$$\text{rank}(\mathbf{M}_{ua}(q)) = n - m$$

em uma região próxima à origem. Essa característica requer que  $m \geq n - m$ , ou seja, que o número de coordenadas ativas seja pelo menos igual ao número de coordenadas passivas. Obviamente essa propriedade se verifica somente para uma parte da classe de sistemas subatuados.

### 2.3.1 Linearização Parcial Colocada

A linearização parcial colocada de um sistema não-linear subatuado consiste em projetar uma realimentação tal que o subsistema referente às variáveis ativas resulte em um sistema linear.

A partir da expressão (20) pode se escrever:

$$\ddot{q}_p = -m_{pp}^{-1}v_p - m_{pp}^{-1}g_p - m_{pp}^{-1}m_{pa}\ddot{q}_a \quad (21)$$

e substituindo na equação (19) obtém-se:

$$(m_{aa} - m_{ap}m_{pp}^{-1}m_{pa})\ddot{q}_a + v_a + g_a - m_{ap}m_{pp}^{-1}v_p - m_{ap}m_{pp}^{-1}g_p = \tau \quad (22)$$

Agora, define-se como entrada de controle a seguinte realimentação:

$$\tau = (m_{aa} - m_{ap}m_{pp}^{-1}m_{pa})u + v_a + g_a - m_{ap}m_{pp}^{-1}v_p - m_{ap}m_{pp}^{-1}g_p \quad (23)$$

onde  $u$  é a nova entrada de controle.

Desse modo, o sistema não-linear subatuado (descrito pelas equações (20) e (19)) pode ser reescrito por:

$$\ddot{q}_p = -m_{pp}^{-1}v_p - m_{pp}^{-1}g_p - m_{pp}^{-1}m_{pa}\ddot{q}_a \quad (24)$$

$$\ddot{q}_a = u \quad (25)$$

A partir do sistema (24)–(25), é possível projetar uma lei de controle que estabilize assintoticamente as variáveis ativas. O comportamento das variáveis passivas será descrito pelo subsistema não-linear (24).

### 2.3.2 Linearização Parcial Não-colocada

Diferentemente do procedimento de linearização parcial colocada, o procedimento de linearização parcial não-colocada consiste em projetar uma lei de controle por realimentação de tal forma que o sistema resultante apresente o subsistema das variáveis passivas linearizado.

Esse procedimento de linearização parcial não-colocada só é realizável se o número de entradas de controle for maior ou igual ao número de variáveis passivas, isto é,  $m \geq \dim(q_p)$ .

A partir de (20), e considerando  $m_{pa}(q)$  não nulo, pode se escrever:

$$\ddot{q}_a = -m_{pa}^{-1}(m_{pp}\ddot{q}_p + v_p + g_p) \quad (26)$$

e substituindo esse resultado em (19) obtém-se

$$(m_{ap} - m_{aa}m_{pa}^{-1}m_{pp})\ddot{q}_p - m_{aa}m_{pa}^{-1}v_p - m_{aa}m_{pa}^{-1}g_p + v_a + g_a = \tau \quad (27)$$

Define-se como entrada de controle a seguinte realimentação:

$$\tau = (m_{ap} - m_{aa}m_{pa}^{-1}m_{pp})u - m_{aa}m_{pa}^{-1}v_p - m_{aa}m_{pa}^{-1}g_p + v_a + g_a \quad (28)$$

onde  $u$  é a nova entrada de controle, e o sistema descrito por (20) e (19) passa a ser descrito por:

$$\ddot{q}_p = u \quad (29)$$

$$\ddot{q}_a = -m_{pa}^{-1}m_{pp}\ddot{q}_p - m_{pa}^{-1}v_p - m_{pa}^{-1}g_p \quad (30)$$

## 2.4 Dinâmica do Robô Bracejador

Considere o sistema mecânico apresentado na Figura 10. A dinâmica desse sistema é dada pela equação:

$$\mathbf{M}(q)\ddot{q} + \mathbf{V}(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \mathbf{B}(q)\tau - f_v \quad (31)$$

onde  $q \in \mathcal{R}^3$  é o vetor de coordenadas generalizadas,  $\mathbf{M}(q)$  é a matriz de inércia simétrica definida positiva dada por:

$$\mathbf{M}(q) = \begin{bmatrix} \alpha_1 + \alpha_2 + 2\alpha_3c_2 + \alpha_4 + 2\alpha_5c_3 & \alpha_2 + \alpha_3c_2 & \alpha_4 + \alpha_5c_3 \\ \alpha_2 + \alpha_3c_2 & \alpha_2 & 0 \\ \alpha_4 + \alpha_5c_3 & 0 & \alpha_4 \end{bmatrix} \quad (32)$$

A função  $\cos(q_i)$  é indicada por  $c_i$  e o mesmo vale para a função  $\sin(q_i)$  que é dada por  $s_i$ . Indica-se por  $c_{ij}$  e  $s_{ij}$ , respectivamente, a função  $\cos(q_i + q_j)$  e  $\sin(q_i + q_j)$ .

Analisando a matriz de inércia (32), tem-se que a variável  $q_1$  é uma variável externa e que as variáveis  $q_2$  e  $q_3$  são variáveis de forma.

A matriz  $\mathbf{V}(q, \dot{q})$  com os termos centrífugos e de Coriolis é dada por:

$$\mathbf{V}(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -\alpha_3\dot{q}_2s_2 - \alpha_5\dot{q}_3s_3 & -\alpha_3\dot{q}_2s_2 - \alpha_3\dot{q}_1s_2 & -\alpha_5\dot{q}_3s_3 - \alpha_5\dot{q}_1s_3 \\ \alpha_3\dot{q}_1s_2 & 0 & 0 \\ \alpha_5\dot{q}_1s_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

O vetor  $G(q)$  apresenta os termos gravitacionais, a saber:

$$G(q) = \begin{bmatrix} \alpha_6 g c_1 + \alpha_7 g c_{12} + \alpha_8 g c_{13} \\ \alpha_7 g c_{12} \\ \alpha_8 g c_{13} \end{bmatrix} \quad (34)$$

As constantes  $\alpha/i$  são definidas como segue:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &\triangleq m_1 \frac{l_1^2}{4} + I_1 + m_2 l_1^2 + m_3 l_1^2 \\ \alpha_2 &\triangleq m_2 \frac{l_2^2}{4} + I_2 \\ \alpha_3 &\triangleq m_2 l_1 \frac{l_2}{2} \\ \alpha_4 &\triangleq m_3 \frac{l_3^2}{4} + I_3 \\ \alpha_5 &\triangleq m_3 l_1 \frac{l_3}{2} \\ \alpha_6 &\triangleq m_1 \frac{l_1}{2} + m_2 l_1 + m_3 l_1 \\ \alpha_7 &\triangleq m_2 \frac{l_2}{2} \\ \alpha_8 &\triangleq m_3 \frac{l_3}{2} \end{aligned}$$

sendo  $l_i$ ,  $m_i$  e  $I_i$ , respectivamente, o comprimento, a massa e o momento de inércia do elo  $i$ .

Neste trabalho será considerada uma configuração em que somente a primeira junta não seja atuada, isto é, há atuadores somente nas juntas 2 e 3. Por definição, um robô braçejador deve apresentar a primeira junta não-atuada, caracterizando-se como um sistema mecânico subatuado. Particularmente ao nosso trabalho, tem-se  $m > n_{GL} - m$ , ou seja, há um número maior de coordenadas diretamente atuadas (ativas) do que de coordenadas indiretamente atuadas (passivas), como apresentado na Figura 12.

Sendo assim, a matriz de seleção de entrada  $\mathbf{B}(q)$ , é dada por:

$$B(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

e o vetor de entradas externas de controle é dado por:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Como pode ser observado, a matriz de seleção  $B$  faz com que as entradas independentes de controle não apareçam concomitantemente na mesma equação da dinâmica, ou seja, as entradas de controle não interagem diretamente em uma mesma equação. Obviamente, as entradas de controle interagem indiretamente no controle do sistema como um todo.

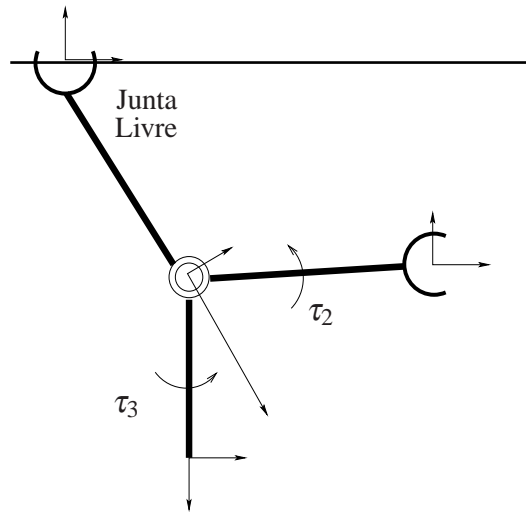


Figura 12: Esquema de atuação considerado neste trabalho.

## 2.5 Análise das Restrições

Conforme apresentado na Seção 1.2, sistemas mecânicos subatuados, em sua grande maioria, apresentam restrições não-holonômicas de segunda ordem. Nessa seção apresenta-se a análise das restrições existentes nos modelos dinâmicos desenvolvidos para as configurações consideradas do robô braçejador.

O modelo dinâmico, devido ao fato de a matriz  $\mathbf{B}(q)$  possuir a primeira linha nula, apresenta uma única restrição, dada pela equação:

$$m_{11}\ddot{q}_1 + m_{12}\ddot{q}_2 + m_{13}\ddot{q}_3 + v_1 + g_1 = 0 \quad (37)$$

### 2.5.1 Aplicação do Teorema de Frobenius

O teorema de Frobenius apresenta condições necessárias e suficientes de integrabilidade, as quais são independentes de coordenadas para restrições diferenciais de qualquer ordem (TARN; ZHANG; SERRANI, 2003). É importante se observar que as restrições diferenciais devem ser transformadas para a forma diferencial de primeira ordem.

A seguir aplica-se o Teorema de Frobenius para classificar a restrição diferencial de segunda ordem (37) presente no modelo dinâmico do robô braçejador subatuado.

Primeiramente a equação (37) deve ser transformada em uma equação diferencial de primeira ordem, dada por:

$$\omega_{11} = m_{11}d\dot{q}_1 + m_{12}d\dot{q}_2 + m_{13}d\dot{q}_3 + h_1 dt \quad (38)$$

sendo  $h_1 = v_1 + g_1$ . A diferencial  $d\omega$  é dada por:

$$d\omega_{11} = dm_{11} \wedge d\dot{q}_1 + dm_{12} \wedge d\dot{q}_2 + dm_{13} \wedge d\dot{q}_3 + dh_1 \wedge dt \quad (39)$$

A seguir, deve se calcular o produto exterior  $\omega_{11} \wedge d\omega_{11}$  referente à restrição. Após manipulação algébrica e aplicação das regras do produto exterior, chega-se à seguinte

igualdade:

$$\begin{aligned}
\omega_{11} \wedge d\omega_{11} &= m_{11}d\dot{q}_1 \wedge (dm_{12} \wedge d\dot{q}_2 + dm_{13} \wedge d\dot{q}_3 + dh_1 \wedge dt) \\
&+ m_{12}d\dot{q}_2 \wedge (dm_{11} \wedge d\dot{q}_1 + dm_{13} \wedge d\dot{q}_3 + dh_1 \wedge dt) \\
&+ m_{13}d\dot{q}_3 \wedge (dm_{11} \wedge d\dot{q}_1 + dm_{12} \wedge d\dot{q}_2 + dh_1 \wedge dt)
\end{aligned} \tag{40}$$

$$\omega_{11} \wedge d\omega_{11} \neq 0 \tag{41}$$

Com base nos resultados obtidos e de acordo com o Teorema de Frobenius, a restrição diferencial de segunda ordem presente no modelo dinâmico para o robô bracejador subatuado é classificada como restrição não-holonômica de segunda ordem.



### 3 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PARA ROBÔS BRACEJADORES SUBATUADOS

Nesse capítulo serão apresentadas as diversas estratégias de controle desenvolvidas para o controle de robôs subatuados a partir dos principais trabalhos encontrados na literatura técnica (seção 3.1) e, também, na seção 3.2, são apresentados os trabalhos que tratam sobre o controle de robôs bracejadores. Na continuidade, no capítulo 4 será apresentada a proposta de controle desse trabalho, baseada na estratégia de controle preditivo baseado no modelo, destacando as vantagens e desvantagens da aplicação dessa estratégia de controle.

#### 3.1 Controle de Robôs Subatuados

A definição 2.2 para sistemas mecânicos subatuados apresenta certa limitação na caracterização de tais sistemas e, para um melhor entendimento, será utilizado como exemplo um robô móvel não-holonômico com atuação diferencial (classe (2,0)) (CAMPION; BASTIN; D'ANDRÉA-NOVEL, 1996), considerando o seu modelo cinemático:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (42)$$

Observa-se que a dimensão do espaço de configuração é igual a 3 e há somente 2 entradas independentes de controle, ou seja,  $m < n_{GL}$ , e de acordo com a definição 2.2, o sistema é considerado subatuado. Entretanto, devido à restrição não-holonômica presente no modelo, as componentes do vetor de coordenadas generalizadas não são independentes, pois não é possível o robô se movimentar lateralmente. Sendo assim, tem-se somente 2 graus de liberdade a serem controlados, o deslocamento para a frente (ou para trás) e a posição angular, o que caracteriza o sistema como sendo completamente atuado.

De modo a unificar o entendimento sobre sistemas subatuados, considerar-se-á subatuado todo sistema que apresentar dimensão do espaço de entradas menor que o número de graus de liberdade a serem controlados.

De acordo com Luca (LUCA et al., 2001), a classe de robôs manipuladores subatuados inclui robôs com elos flexíveis, robôs com juntas elásticas ou robôs com juntas passivas, os quais se apresentam como os mais difíceis de se controlar, devido a propriedades estruturais do sistema. Observando ainda o trabalho de (LUCA et al., 2001), existem três problemas quando se considera o controle de robôs subatuados, a saber:

- planejamento de trajetória,

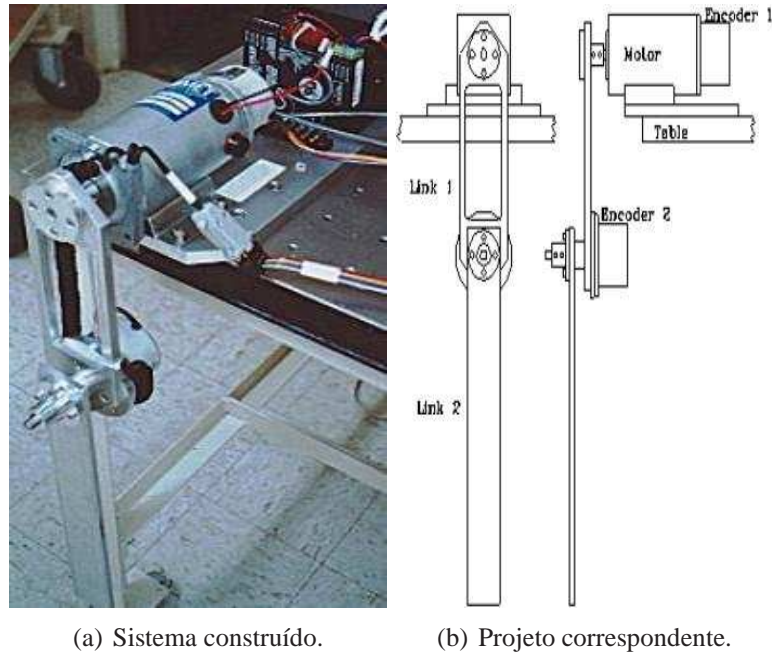


Figura 13: Protótipo desenvolvido no Departamento de Controle Automático do Instituto de Tecnologia de Lund.

- seguimento de trajetória,
- estabilização em um ponto.

Para os dois primeiros problemas, (ORIOLO; NAKAMURA, 1991) apresentam como solução o uso uma linearização exata por realimentação dinâmica de estado e para o último problema utiliza técnicas de *iteractive steering*.

Na literatura sobre robôs manipuladores subatuados existem dois protótipos que são geralmente utilizados como referência: o Pendubot (SPONG; BLOCK, 1995) e o Acrobot (SPONG, 1995). O Pendubot, mostrado na Figura 13, apresenta atuação na primeira junta, enquanto o Acrobot (Figura 14), possui atuação na segunda junta.

A tarefa de controle desses sistemas é estabilizar o robô na posição de equilíbrio instável (os dois elos alinhados verticalmente para cima), tendo como posição inicial o ponto de equilíbrio estável (os dois elos alinhados verticalmente para baixo). Para tal, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos os quais, na sua grande maioria, utilizam uma estratégia que consiste em utilizar duas abordagens de controle para garantir a estabilização do robô. Essa estratégia de controle divide a tarefa de estabilização em duas fases, sendo que na primeira o robô deve balançar até atingir a posição de referência (*swing-up control*). Já na segunda fase utiliza-se um controle para garantir a estabilização do sistema, geralmente linearizando o modelo e aplicando alguma técnica de controle linear. Alguns dos principais trabalhos sobre o tema são apresentados a seguir e, também, nas suas referências.

Spong (SPONG, 1994a) apresenta, para a fase de balanço do movimento, uma estratégia de controle baseada na linearização parcial colocada e análise da dinâmica zero; para a segunda fase do movimento utiliza a técnica de controle LQR (*Linear Quadratic Regulator*), a partir da linearização do modelo em torno do ponto de estabilização. Em (SPONG, 1994b,c) Spong apresenta resultados utilizando, dessa vez, linearização parcial não-colocada.

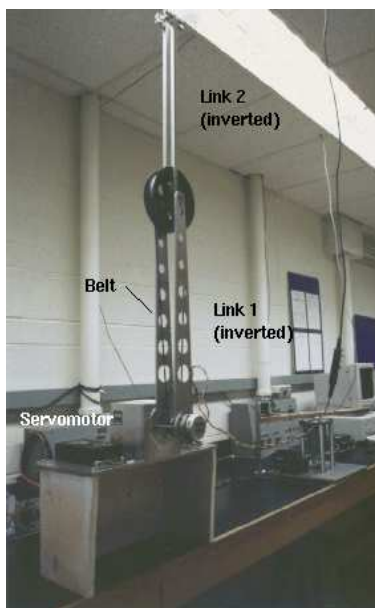


Figura 14: Protótipo do Acrobot desenvolvido no Departamento de Eng. Elétrica e de Computação da Universidade de Toronto.

Técnicas inteligentes, como raciocínio simbólico ou técnicas de inteligência artificial, foram introduzidas na estratégia de controle. Em (DEJONG; SPONG, 1994) foram estudadas três diferentes estratégias, quais sejam: *Heuristic Control* (HC), *ATAN* e *Explanation Based Control* (EBC).

Na continuidade dos trabalhos, em (SPONG, 1995) Spong apresenta duas técnicas de controle para a fase de balanço, uma baseada no conceito de linearização parcial e outra baseada na energia transferida ao elo não atuado. Para a segunda fase utiliza um regulador linear quadrático. (XIN; KANEDA, 2002) também apresentam uma estratégia baseada na energia dos elos. A estratégia de controle baseada na energia consiste em injetar energia no sistema através do balanço do elo atuado em fase com o movimento do elo não-atuado, de tal forma que a energia transmitida ao elo não atuado permita que a amplitude do seu movimento seja cada vez maior.

Em (LEE; SMITH, 1994; SANCHEZ; FLORES, 2002; SMITH et al., 1997; SMITH; ZHANG; GRUVER, 1998) propõe-se o uso de Algoritmos Genéticos, DSFS (*Dynamic Switching Fuzzy Systems*) e *Meta-Rule Techniques* para o projeto e sintonia automáticos de sistemas nebulosos para o controle de balanço do Acrobot. Em (ROSAS-FLORES; ALVAREZ-GALLEGOS; CASTRO-LINHARES, 2000) é aplicada uma transformação de coordenadas a fim de descrever o modelo na forma normal cascadeada (*cascade form*). Em seguida é proposta uma estratégia de controle baseada na técnica de *backstepping*.

(YAMADA; YUZAWA, 2002) apresentam uma estratégia para estabilização do sistema na posição vertical para cima baseada na linearização aproximada do modelo dinâmico do Acrobot. O procedimento consiste em determinar uma matriz de transformação de estado que transforme aproximadamente o modelo não-linear para a forma canônica controlável. Em seguida, uma realimentação não-linear que lineariza o sistema é empregada, transformando a forma canônica controlável em um sistema linear estável.

(KOBAYASHI et al., 2002) apresentam duas estratégias distintas para o Acrobot. A primeira estratégia de controle utiliza uma única lei de controle tanto para a fase de balanço quanto para a fase de estabilização. A idéia é empregar técnicas que utilizam LMI

em sua solução para obter uma realimentação tal que o sistema linearizado, em malha fechada, seja instável na posição vertical para baixo e estável na posição vertical para cima. Entretanto, tal abordagem mostrou-se não realizável devido aos altos ganhos necessários. A decisão foi utilizar essa estratégia somente para a fase de balanço, empregando um regulador ótimo para a fase de estabilização na posição de equilíbrio instável. Nesse trabalho também se emprega a técnica de controle baseada em energia para a fase de balanço.

(ZHANG; TARN, 2003) apresentam condições de integrabilidade para as restrições não-holonômicas de segunda ordem do sistema. Para o controle utiliza linearização parcial e controle ótimo linear quadrático. (TARN et al., 2005) utilizam uma estratégia de controle linear quadrático para a fase de balanço e apresentam a técnica de regulação de saída para a fase de estabilização.

(HENMI et al., 2004) consideram a existência de um limite de rotação para o segundo elo e apresenta uma estratégia de controle baseada na técnica de ginástica *Furidashi*. Em (HENMI; DENG; INOUE, 2006), apresentam uma modificação na estratégia de controle proposta em (SPONG; VIDYASAGAR, 1989) utilizando a teoria de Lyapunov.

Em (MITA et al., 2002; YONEMURA; YAMAKITA, 2004) propõe-se uma estratégia de controle para a fase de balanço baseada em uma função de saída e aspectos relacionados a singularidades existentes. (YAZICI; KARAMANCIOGLU, 2005) apresentam uma estratégia de controle linear quadrático para estabilização robusta utilizando modelo com incerteza estruturada, utilizando análise  $\mu$ . (ARAKI; OKADA; KONISHI, 2005) apresentam um método para a identificação dos parâmetros do sistema baseado em UKF (*Unscented Kalman Filtering*)

(BANAVAR; MAHINDRAKAR, 2003) também utilizam estratégia de controle baseada na energia fornecida para o robô atingir a posição vertical para cima e, em uma vizinhança desse ponto, passa a considerar um regulador linear quadrático ótimo para a estabilização. O aspecto importante desse trabalho é a questão de otimalidade temporal do sistema em malha fechada.

Em (PUGA; AGUILAR, 2005) encontra-se uma proposta de controle para o Acrobot, que também faz uso das duas fases de balanço e estabilização. Em ambas as fases aplica-se a estratégia de modos deslizantes, com o *twisting algorithm* para garantir robustez e estabilização em tempo finito.

Algumas outras estratégias de controle desenvolvidas para sistemas subatuados com juntas passivas consideram a presença de freios nas juntas passivas, impedindo que se movimentem livremente (ARAI; TANIE; SHIROMA, 1998; KIM et al., 2001; SIQUEIRA, 2004). Há, também, estratégias que consideram a ausência de gravidade (HONG, 2002; SIQUEIRA; TERRA, 2002; SUZUKI; MIYOSHI; NAKAMURA, 1998; WANG et al., 2004).

Uma técnica de controle de sistemas não-lineares que tem recebido bastante atenção da comunidade científica na aplicação em sistemas subatuados é a estratégia de controle baseada em passividade (FANTONI; LOZANO, 2002). A idéia nessa abordagem é utilizar as propriedades de passividade do sistema para fazer com que o sistema atinja sua órbita homoclínica para resolver o problema de *swing-up* e, a partir desse momento, faz uso de um esquema de controle (LQR, por exemplo), que garanta estabilidade assintótica. Outras estratégias de controle para sistemas não-lineares subatuados podem ser encontradas nos trabalhos indicados (AGUILAR et al., 2006; ALBU-SCHÄFFER; OTT; HIRZINGER, 2005; ORTEGA et al., 2002; SHIRIAEV; KOLESNICHENKO, 2000).

### 3.2 Controle de Robôs Bracejadores

O primeiro trabalho sobre robôs bracejadores foi desenvolvido pela equipe do Prof. Toshio Fukuda (FUKUDA; HOSOKAL; KONDO, 1991), onde apresentam um robô com seis elos e 5 juntas atuadas, o qual se utiliza da força gravitacional para balançar, com o objetivo de alcançar um ponto mais à frente, para se deslocar horizontalmente. Tal movimento procura imitar o modo como os macacos se locomovem entre as árvores.

A proposta é estudar o comportamento do robô durante a execução de um ciclo completo de movimento, levando em consideração aspectos relacionados à eficiência energética do sistema. Para a realização de simulações utilizou-se um modelo linearizado para a dinâmica do robô e se identificou as frequências naturais do modelo, tomando-as como parâmetros de amplitude para as entradas senoidais de controle.

Na sequência, em (FUKUDA; SAITO; ARAI, 1991) é apresentado um protótipo mais simples, com somente dois elos e uma única junta atuada (junta 2). A idéia é gerar entradas de controle para que o robô execute o movimento sem conhecimento prévio da dinâmica do sistema. A partir de uma trajetória gerada por métodos heurísticos e por meio de repetidas execuções, uma rede neural CMAC (*Cerebellar Model Arithmetic Computer*) generaliza as relações dinâmicas do robô. Duas estratégias de controle são propostas para a tarefa de agarrar um ponto fixo de apoio: controle de trajetória e controle de direção do braço. A estratégia consiste em deixar que movimentos largos/amplos sejam realizados pelo torque obtido a partir da rede neural treinada e, quando a garra estiver próxima à posição desejada, o segundo controlador fique responsável pelos movimentos suaves para aproximação da garra ao ponto de apoio e por efetivamente segurar na posição desejada.

Em (SAITO; FUKUDA; ARAI, 1993, 1994) apresenta-se uma estratégia de controle parecida, a qual utiliza excitação paramétrica somente com informações sobre o centro de gravidade no lugar da rede CMAC. Os resultados mostram que o robô é capaz de atingir o ponto desejado a partir de uma posição inicial estática e, inclusive, tendo velocidades não-nulas no ponto inicial, contemplando o caso em que o robô não consegue atingir o ponto de apoio na primeira tentativa.

Nishimura (NISHIMURA; FUNAKI, 1996, 1998) apresenta um robô com 3 juntas rotacionais, com atuação das duas últimas juntas (a primeira junta é passiva). Utilizando linearização estendida, considera a dinâmica do robô como sendo linear e variante no tempo. Como estratégia de controle emprega a técnica de controle de estado final e aprendizagem do erro.

Em (NAKANISHI; FUKUDA; KODITSCHKEK, 1997, 1998, 2000) apresentam uma estratégia de controle baseada na inversão do modelo da planta por linearização entrada/saída do sistema e, em vez de propor que o sistema siga uma trajetória de referência, propõe que o sistema siga uma dinâmica de referência (*Target Dynamics*). Em trabalho subsequente (NAKANISHI; FUKUDA; KODITSCHKEK, 1999a) apresentam uma solução para o problema de movimento com distância irregular entre os pontos de apoio na barra horizontal. Em (NAKANISHI; FUKUDA, 2000) apresentam solução para a situação de o robô ficar solto no ar durante a transição de um ponto de apoio para outro.

Em (ODAGAKI; MORAN; HAYASE, 1997) fazem um estudo comparativo entre duas estratégias distintas de controle para um robô bracejador com 3 elos, sendo que a primeira estratégia considera somente as propriedades não-lineares do modelo, ignorando a característica de subatuação. Entretanto, a segunda estratégia utilizada leva em consideração tanto as características de não-linearidade quanto as de subatuação do modelo.

Na primeira estratégia de controle o modelo dinâmico é linearizado e se determina a dinâmica do erro de rastreamento da postura de referência. A partir da minimização

de uma função objetivo quadrática determina-se a entrada de controle ótima. Na segunda estratégia, também utiliza-se o modelo linearizado, separando-se as variáveis em variáveis ativas (diretamente atuadas) e variáveis passivas (não-atuadas). Em um primeiro momento determina-se uma trajetória de referência para as variáveis atuadas e, a partir do modelo, determina-se a trajetória de referência correspondente para as variáveis passivas. Uma vez determinada essa trajetória para as variáveis do sistema, emprega-se a primeira estratégia de controle desenvolvida.

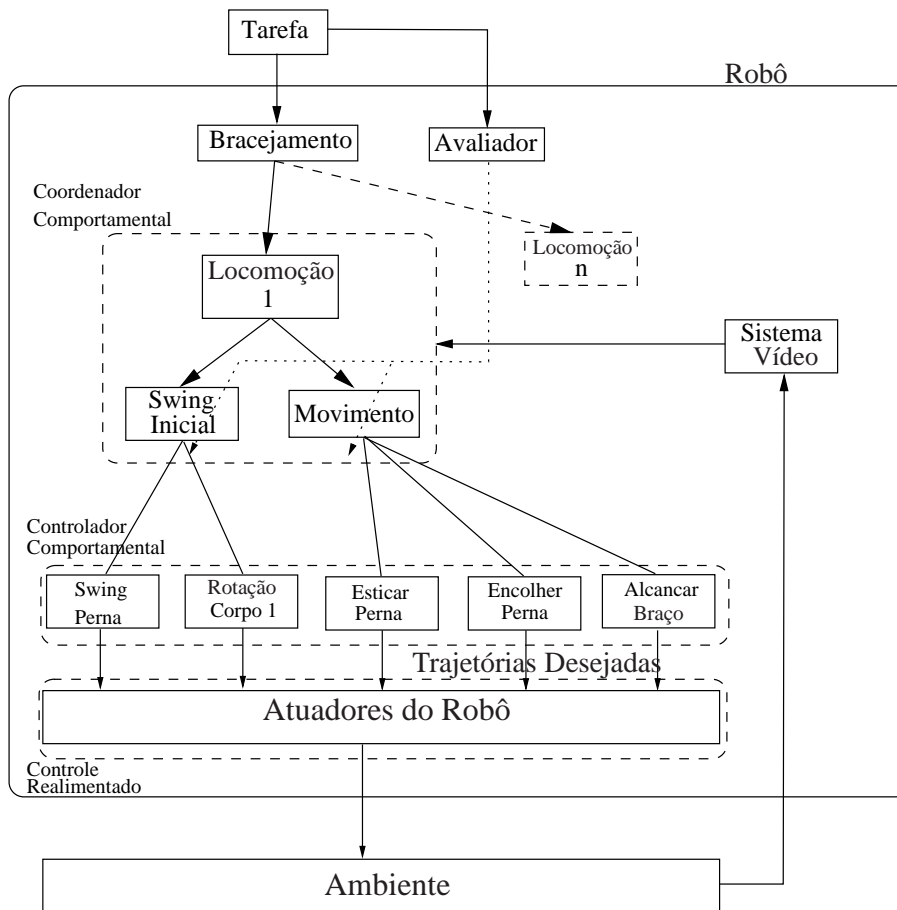


Figura 15: Estrutura do controlador baseado em comportamento hierárquico.

(NAKANISHI; FUKUDA; KODITSCHKEK, 1999b) apresentam uma estratégia de controle baseada em lógica difusa, com a técnica *Self-Scaling Reinforcement Learning*, aplicada a um robô bracejador com dois elos e em (HASEGAWA; FUKUDA; ITO, 2000) apresenta-se um controlador baseado em comportamento hierárquico, cujo diagrama de blocos pode ser observado na Figura 15, onde propõe um algoritmo para adaptação e aprendizado para o controlador. Observa-se que nessa estratégia de controle o movimento completo de bracejamento é dividido em vários módulos, considerando a composição do movimento por meio da realização e coordenação de movimentos mais simples, como mover braço, esticar corpo, etc. Além disso, tem-se um sistema externo de visão que serve para alimentar o sistema com informações do movimento realizado.

Um dos trabalhos mais recentes desenvolvidos para o controle de robôs bracejadores é o PDAC (*Passive Dynamic Autonomous Control*) (FUKUDA et al., 2007), inicialmente desenvolvido com o objetivo de controlar robôs bípedes (DOI; HASEGAWA; FUKUDA, 2004). Essa técnica consiste em considerar uma restrição holonômica virtual para a junta

não atuada, a qual será expressa em relação a uma outra junta atuada do sistema, sendo possível descrever a dinâmica por um sistema autônomo unidimensional. Além disso, utiliza um robô com 4 elos, ilustrado na Figura 16, que permite a realização do movimento de *over-hand swing*, o qual consiste em deslocar o braço por cima do corpo e não mais lateralmente, no caso de *under-swing motion*. A Figura 16(a) apresenta um modelo simplificado para o robô de multilocomoção considerando somente 4 elos, permitindo que se possa variar o comprimento do elo para a realização do movimento, que é apresentado na Figura 16(b).

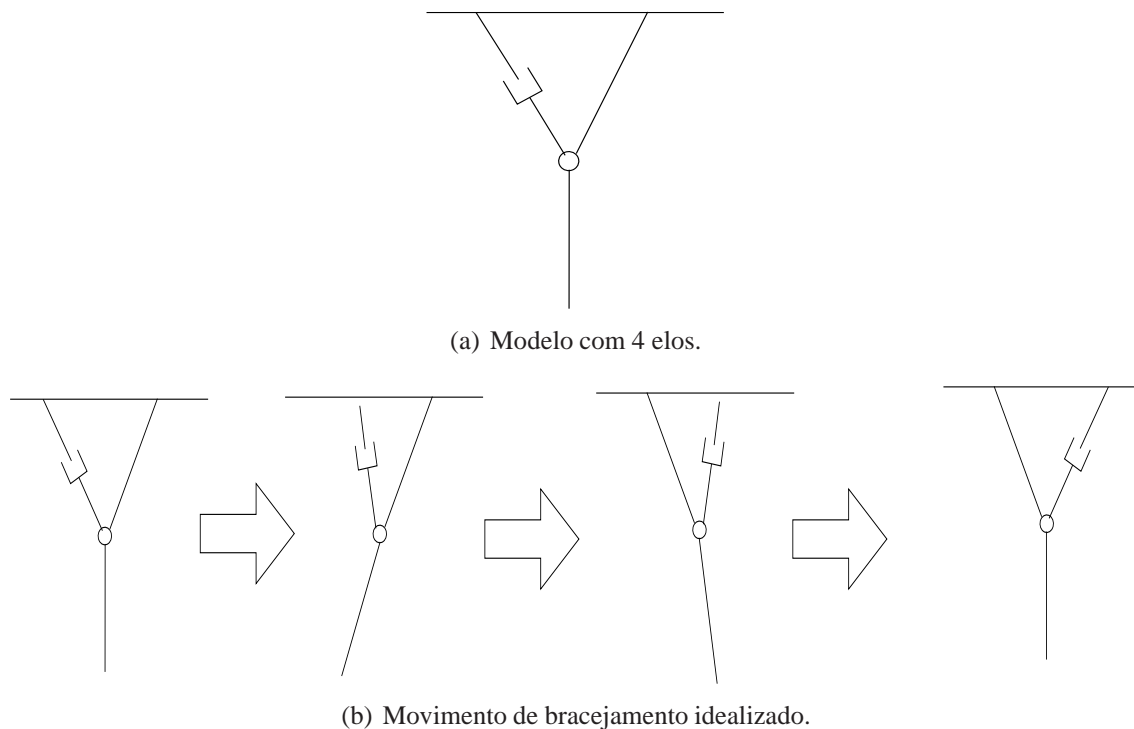


Figura 16: Modelo simplificado de robô bracejador multi-locomoção.

### 3.3 Considerações Gerais

Ao longo deste capítulo foram apresentadas as diferentes abordagens empregadas para o controle de sistemas subatuados de modo geral. Também, com particular interesse, foram mostradas as diversas estratégias de controle utilizadas para o controle de robôs bracejadores, com o intuito de apresentar o que foi desenvolvido pela comunidade científica até o momento.

De maneira geral, as diferentes técnicas de controle empregadas apresentam algumas limitações na sua aplicação. Várias estratégias utilizam um modelo parcialmente linearizado para a dinâmica não-linear do sistema; outras estratégias consideram uma estrutura híbrida de controle, isto é, uma estratégia de controle para aproximar o robô da posição de equilíbrio desejada e outra para estabilizar o robô nessa posição, realizando um chaveamento entre os controladores empregados.

Para o caso de robôs bracejadores, as estratégias de controle utilizadas estão fortemente atreladas ao tipo de movimento de bracejamento que se pretende realizar, não sendo possível executar tanto o movimento de *under-swing* quanto o movimento de *over-hand* utilizando a mesma estratégia de controle. Uma característica importante no movimento

é a distância entre os pontos de apoio, que podem ser regulares ou irregulares; entretanto, as estratégias consideram técnicas diferentes para distâncias iguais e outras técnicas para distâncias diferentes.

Algumas estratégias de controle utilizam técnicas de inteligência artificial que necessitam de uma fase de aprendizado, geralmente de maneira *offline*, o que cria a necessidade de uma etapa a mais para o treinamento e ajuste de parâmetros. Além disso, tais técnicas geram uma estrutura estática, fazendo com que a cada alteração nos parâmetros do robô seja necessária uma nova etapa de treinamento.

Além de todas as limitações já expostas, nenhuma das diferentes abordagens de controle apresentadas leva em consideração, para o cálculo do sinal de controle, as restrições físicas impostas ao robô, como limite de torque fornecido por cada um dos atuadores e limite de deslocamento angular de cada junta, bem como velocidade exigida.

Uma questão importante ainda sem resposta na comunidade científica em relação ao controle de sistemas subatuados diz respeito à estabilização do sistema em malha fechada em uma posição final que não seja um ponto de equilíbrio (seja um ponto de equilíbrio estável ou um ponto de equilíbrio instável). Como pode-se observar, o movimento de bracejamento tem por objetivo fazer com que o robô se movimente e consiga atingir a linha de sustentação, ou seja, fazer com que o robô consiga atingir um ponto que não seja um ponto de equilíbrio.

A estabilidade demonstrada pelas diversas estratégias de controle apresentadas é válida somente para o caso de estabilização em um ponto de equilíbrio (geralmente o ponto de equilíbrio instável), o que não acontece quando se tem o movimento de bracejamento ao longo de uma linha.

Fica evidente, também, a necessidade de se qualificar e, se possível, quantificar a influência da característica de subatuação presente no robô, na tentativa de identificar o quanto essa propriedade reduz a mobilidade e a manobrabilidade do sistema.

No capítulo seguinte será descrita a estratégia MPC (*Model-based Predictive Control*), aplicada ao controle do robô bracejador previamente ilustrado na Figura 10 e melhor detalhado no Capítulo 2, a qual se apresenta como uma solução viável para fazer frente às dificuldades já comentadas.



## 4 CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO

A partir de meados da década de 1980, vários autores começaram a utilizar esquemas de controle preditivo (CAMPO; MORARI, 1987; CHEN; SHAW, 1982; CLARKE; MOHTADI; STUFFS, 1987; GARCÍA; PRETT; MORARI, 1989) e desde então essa técnica de controle tem sido desenvolvida e utilizada em diversas aplicações práticas. A expressão **controle preditivo baseado em modelo**, também chamada de **controle com horizonte móvel ou *Receding Horizon (RH)*** (WALLER, 2000), não designa uma técnica de controle específica mas, sim, uma variedade de métodos de controle, os quais fazem uso de um modelo do processo para obter o sinal de controle, a partir da minimização de uma função objetivo.

É possível classificar os algoritmos MPC considerando-se três diferentes aspectos, quais sejam: natureza da solução obtida, modo de obtenção da solução e qualidade da solução obtida. A Figura 17 apresenta os três diferentes modos de se classificar um algoritmo MPC.

Considerando-se a natureza da solução a ser obtida, pode-se classificar o algoritmo MPC em linear e não-linear. O MPC linear apresenta um sistema a ser controlado cuja dinâmica é descrita por meio de um conjunto de equações lineares. De maneira análoga, o MPC não-linear emprega um modelo não-linear para descrever a dinâmica do processo a ser controlado.

Já com relação ao modo de obtenção da solução do problema, pode-se ter uma solução analítica, ou seja, a solução é expressa por uma expressão definida para a entrada de controle; ou uma solução numérica, quando a entrada de controle é obtida iterativamente

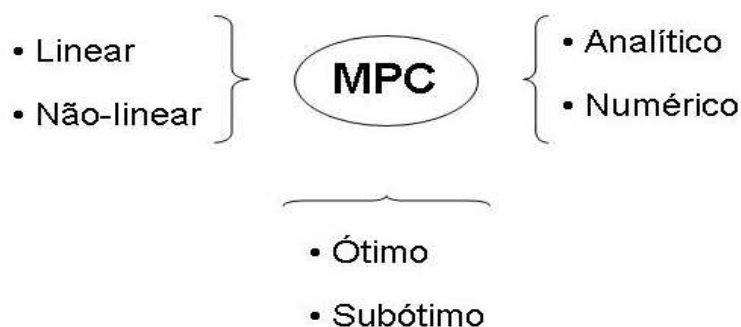


Figura 17: Diferentes classificações para os algoritmos MPC.

por algoritmos numéricos. Geralmente a solução analítica é utilizada quando se emprega um modelo linear para descrever a dinâmica do processo. Devido à grande dificuldade de se obter uma solução analítica para o caso não-linear utiliza-se, comumente, a solução numérica.

É possível, ainda, classificar os problemas MPC (tanto lineares quanto não-lineares) com relação à qualidade da solução obtida (quer seja uma solução analítica, quer seja uma solução numérica), ou seja, se a solução encontrada é uma solução ótima ou uma solução subótima. Geralmente para os casos lineares é possível encontrar uma solução que seja ótima segundo algum critério, o que dificilmente ocorre quando se trata de problemas não-lineares. As idéias básicas presentes na família de controladores preditivo são (CAMACHO; BORDONS, 1999):

- uso explícito de um modelo do sistema para se obter uma predição da saída do sistema em instantes futuros de tempo;
- cálculo de uma seqüência de controle que, uma vez aplicada durante um determinado intervalo de tempo ao sistema a ser controlado, minimiza o valor da função objetivo;
- estratégia recorrente, pois uma vez obtida a seqüência de controle, o primeiro elemento é aplicado ao sistema e, no próximo instante de amostragem, avançam os horizontes de predição e de controle, repetindo-se o procedimento a partir de nova leitura da saída do sistema.

As diversas soluções (algoritmos) MPC diferem entre si em relação a três itens, a saber: tipo de modelo que utilizam para representar o processo, função objetivo, a qual será otimizada e, por último, em relação ao algoritmo de otimização que será empregado. O esquema de controle MPC apresenta-se de forma aberta, ou seja, existe uma definição em alto nível do que deve ser implementado, mas deixa livre para o projetista escolher a maneira como implementar cada uma das etapas do esquema de controle, de modo que vários trabalhos têm sido desenvolvidos e amplamente aceitos tanto pela academia quanto pela indústria.

Existem várias aplicações em que se emprega o MPC de modo satisfatório, dentre as quais destacam-se trabalhos em controle de processos ((LIMÓN; ÁLAMO; CAMACHO, 2003; MHASKAR; EL-FARRA; CHRISTOFIDES, 2005; TIAGOUNOV; WEILAND, 2003; WAN; KOTHARE, 2004; WANG; THOMAS, 2006)) e controle de robôs ((GU; HU, 2005; KÜHNE, 2005; LAGES; ALVES, 2006; NORMEY-RICO; GÓMEZ-ORTEGA; CAMACHO, 1999; OLIVEIRA KOTHARE; MORARI, 2000; SHIM; KIM; SASTRY, 2003; WESSELOWSKI; FIERRO, 2003)). Os bons resultados obtidos nessas diversas aplicações mostram a capacidade do MPC em conseguir alta eficiência em controle de sistemas mecânicos.

Em relação a outros métodos de controle, destacam-se como principais vantagens do MPC:

1. pode ser utilizado para controlar diferentes tipos de processos, desde sistemas com dinâmicas bem comportadas a sistemas mais complexos, incluindo sistemas com atraso, de fase não-mínima e instáveis;
2. pode ser facilmente modificado para o caso multivariável;
3. trata restrições de modo direto, as quais podem ser incluídas de modo sistemático durante o projeto;

4. é uma metodologia totalmente aberta, baseada em certos princípios básicos, o que permite constantes melhorias.

Logicamente, essa estratégia apresenta algumas desvantagens. Embora essa estratégia de controle pareça, em um primeiro momento, ser facilmente implementada, verificou-se que essa estratégia apresenta um alto grau de complexidade para sua implementação. Faz-se necessário um grande esforço para encontrar a solução do problema de otimização e uma grande experiência para o ajuste dos parâmetros de ponderação da função objetivo, uma vez que não existe um método para sua obtenção. Quando se considera, para a solução do problema de otimização, as restrições impostas ao sistema, a carga computacional é ainda maior do que o caso mais simples, desconsiderando as restrições. Todavia, como a capacidade computacional disponível atualmente é cada vez maior, tal desvantagem tende a ser cada vez menos importante.

Apesar disso tudo, a principal desvantagem ainda é a necessidade de um modelo apropriado que descreva o comportamento do processo de forma precisa. O algoritmo desse esquema de controle baseia-se no conhecimento a priori do modelo, sendo óbvio que os resultados serão afetados por discrepâncias existentes entre o modelo teórico e o processo real.

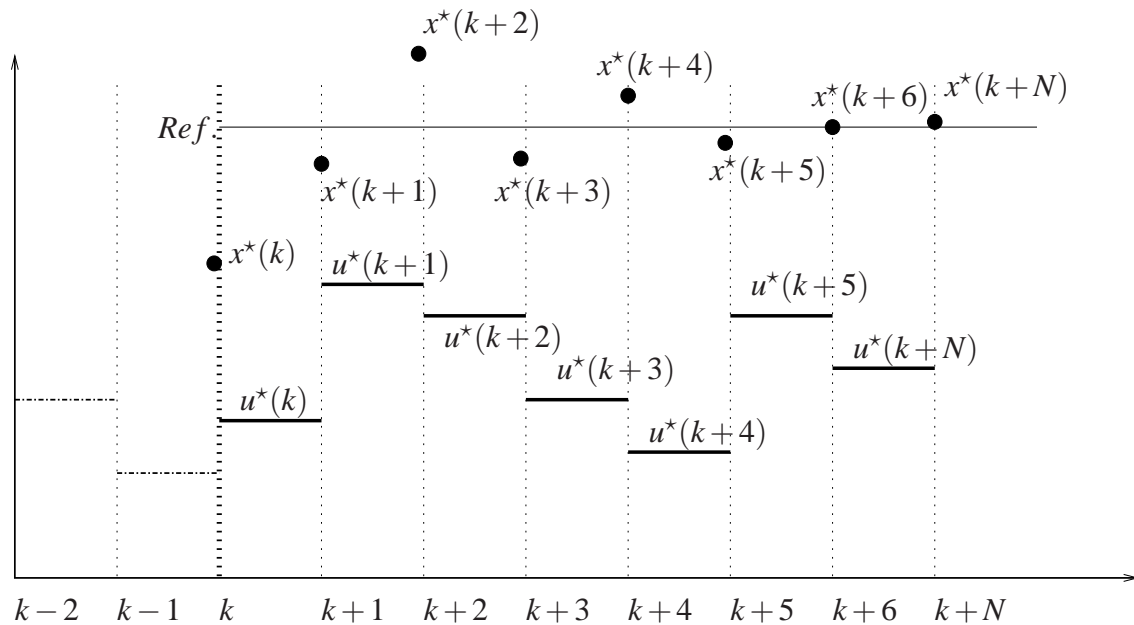


Figura 18: Princípio de funcionamento do MPC.

Na Figura 18 apresenta-se a aplicação de um algoritmo de controle baseado na estratégia MPC a um sistema dinâmico, com a finalidade de gerar uma lei de controle ótima  $u^*$  que conduza o sistema às posições  $x^*$ , permitindo que o sistema se estabilize na posição de referência desejada.

A metodologia de todos os controladores pertencentes à família de MPC apresenta a seguinte estratégia:

1. saídas futuras para um determinado horizonte  $N$ , geralmente chamado de *horizonte de predição*, são previstas a cada instante  $t$ , utilizando-se o modelo. Essas saídas  $y(t+k|t)$ , para  $k = 1, \dots, N$ , dependem de valores conhecidos (entradas e saídas passadas) até o instante  $t$  e de valores futuros de controle  $u(t+k|t)$ , para  $k = 0, \dots, N-1$ ;

2. o conjunto de valores futuros de controle é calculado pela otimização de um critério pré-determinado, a fim de manter o processo o mais próximo possível da trajetória de referência;
3. o sinal de controle  $u(t|t)$  é aplicado ao processo e os demais valores de  $u(t+k|t)$  são descartados, pois no próximo instante de amostragem  $y(t+1)$  já é conhecido e os passos 1, 2 e 3 são repetidos com este novo valor. Assim  $u(t+1|t+1)$  é calculado utilizando o conceito de horizonte deslizante (em princípio o valor será diferente de  $u(t+1|t)$ ).

De maneira geral, um algoritmo MPC no instante de tempo inicial, recebe as informações sobre o sistema e atualiza as variáveis. Com base nessas informações atualizadas, o próximo passo é a predição das futuras ações de controle, a partir da otimização da função objetivo projetada. Ao final da fase de predição das entradas de controle, escolhe-se o primeiro elemento da seqüência ótima de controle obtida e aplica-se no sistema. A partir daí o procedimento se repete, até ser alcançada a estabilização do sistema.

A estrutura geral de um algoritmo implementando a estratégia MPC e os passos dessa estratégia podem ser observados e melhor entendidos por meio da Figura 19.

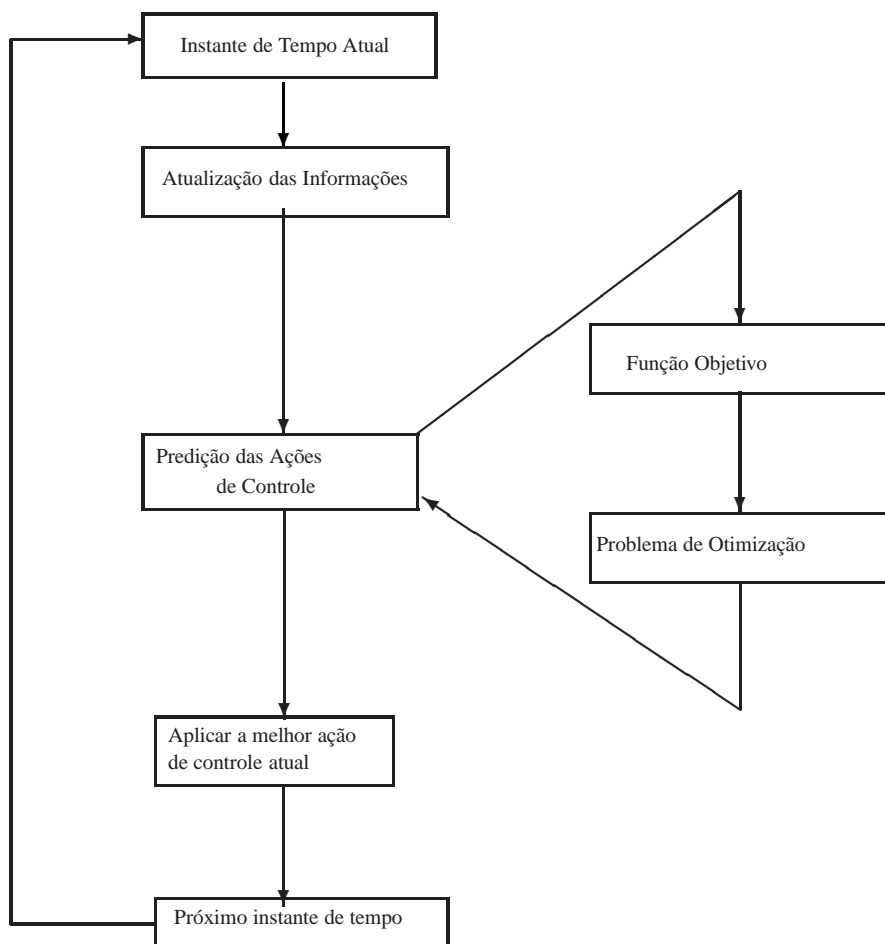


Figura 19: Visão geral do esquema de controle preditivo.

O modelo do processo tem um papel decisivo nessa estratégia de controle. Ele deve ser simples de se implementar e, ainda assim, ser capaz de capturar a dinâmica dominante do processo, para que as predições dos valores futuros da saída do sistema seja o mais

fiel possível às respostas do processo. O modelo de predição é um dos componentes da metodologia MPC que apresenta variações. Assim, diferentes tipos de modelos são utilizados nesse esquema de controle, de maneira adequada à aplicação.

Em aplicações na indústria, geralmente emprega-se a resposta truncada à entrada impulso, devido a sua simplicidade. Semelhantemente, tem-se a resposta à entrada degrau. Já para desenvolvimentos acadêmicos é bastante comum encontrar o uso da função de transferência como modelo; mais adequado aos casos multivariáveis tem-se o modelo no espaço de estado. Como já mencionado anteriormente, o MPC não é uma técnica única e, sim, um conjunto de diferentes implementações de uma mesma estratégia.

Na Figura 20 tem-se um diagrama de blocos do funcionamento geral da estratégia de controle MPC. Observa-se nesse diagrama que a predição das saídas futuras, dentro do horizonte de predição, dependem das entradas e das saídas passadas (já obtidas anteriormente), além das entradas futuras. As entradas futuras, por sua vez, serão conhecidas através da otimização da função objetivo especificada, levando em consideração a existência de possíveis restrições. O erro entre as saídas futuras encontradas e a referência também serão utilizadas na solução do problema de otimização.

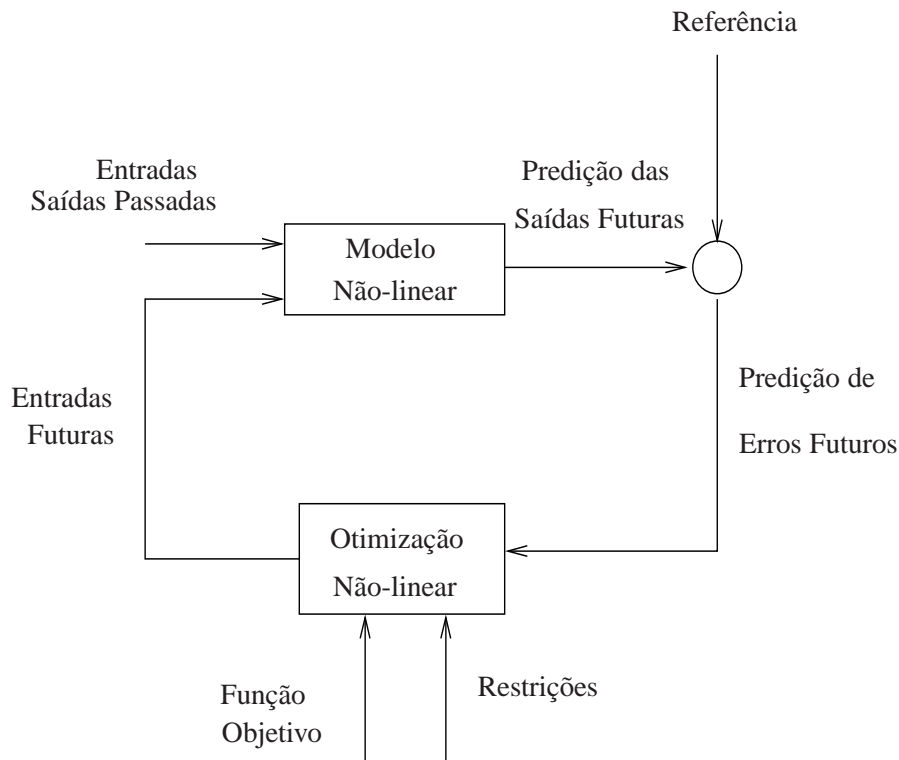


Figura 20: Estrutura genérica da estratégia de controle preditivo.

## 4.1 Formulação do Problema MPC

Os elementos básicos presentes em todos os controladores preditivos baseados em modelo são: modelo de predição, função objetivo e cálculo da ação de controle. O modelo de predição é a parte central da estratégia MPC, devido à importância de se prever as saídas futuras do sistema. No esquema proposto neste trabalho, o modelo dinâmico representado na forma de variáveis de estado é utilizado como modelo de predição, mas em diferentes esquemas de MPC, outros modelos podem ser utilizados (CAMACHO;

BORDONS, 1999). A função objetivo define o critério de otimização, a fim de garantir a geração de uma seqüência de controle que governe o sistema do modo desejado.

Considere um modelo dinâmico genérico não-linear dado por:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (43)$$

e a sua versão discretizada, expressa por:

$$x(k+1) = f_d(x(k), u(k)) \quad (44)$$

onde  $x(\cdot)$  é o vetor de estado e  $u(\cdot)$  é o vetor de entradas de controle.

A função objetivo a ser minimizada assume, em geral, a seguinte forma (CAMACHO; BORDONS, 1999):

$$\Phi(k) = \sum_{j=1}^N x_e^T(k+j|k) \mathbf{Q} x_e(k+j|k) + u^T(k+j-1|k) \mathbf{R} u(k+j-1|k) \quad (45)$$

onde  $N$  é o horizonte de predição e  $\mathbf{Q} \geq 0$  e  $\mathbf{R} \geq 0$  são matrizes de ponderação que penalizam, respectivamente, o erro de estado  $x_e$  e o esforço de controle. O erro de estado  $x_e \triangleq x - x_r$  é a diferença entre o valor atual do estado e a referência.

Uma função objetivo modificada, proposta por (ESSEN; NIJMEIJER, 2001), usada também em (KÜHNE, 2005), é apresentada a seguir:

$$\Phi(k) = \sum_{j=1}^N x^T(k+j|k) \mathbf{Q}(j) x(k+j|k) + \quad (46)$$

$$+ \sum_{j=1}^N \tau^T(k+j-1|k) \mathbf{R}(j) \tau(k+j-1|k) + \quad (47)$$

$$+ \Omega(x(k+N|k)) \quad (48)$$

com

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}(j) &= 2^{j-1} \mathbf{Q} \\ \Omega(x(k+N|k)) &= x^T(k+N|k) \mathbf{P} x(k+N|k), \quad \mathbf{P} \geq 0 \end{aligned} \quad (49)$$

onde a matriz de ponderação  $\mathbf{Q}(j)$  cresce de modo exponencial durante o horizonte de predição  $N$  e  $\Omega(x(k+N|k))$  é o chamado custo terminal, sendo  $\mathbf{P}$  uma matriz tal que aumenta o peso dos estados no final do horizonte de predição, na tentativa de fazer com que  $x(k+N|k)$  se aproxime da posição desejada.

Segundo (CAMACHO; BORDONS, 1999), em qualquer aplicação prática, o sistema como um todo sempre estará sujeito a restrições, na sua maioria classificadas em três diferentes tipos, quais sejam:

- a) limites físicos,
- b) limites de segurança e
- c) limites operacionais.

Os limites físicos dizem respeito a restrições mecânicas, resultado da própria construção do equipamento, por exemplo chaves fim de curso. É evidente que esses limites não podem ser violados sem causar danos ao sistema. Já os limites de segurança devem ser obedecidos a fim de não estressar o próprio equipamento e, também, para evitar acidentes com operadores próximos ao local de operação.

Por fim, tem-se os limites operacionais, que estão diretamente relacionados ao modo de funcionamento do sistema e ao seu desempenho. Esses limites podem ser violados, eventualmente, a fim de evitar algum acidente com os operadores ou mesmo para evitar algum problema mecânico no sistema.

Todos esses tipos de limites existentes em situações práticas podem ser expressos como restrições tanto nas variáveis de estado quanto nas variáveis de controle do sistema. Em geral as restrições relacionadas às variáveis de estado dizem respeito a limites físicos, mas limites de segurança e operacional podem também gerar restrições no estado. Já restrições concernentes à variável de controle podem ser impostas por limites operacionais relativos, por exemplo, ao torque máximo do atuador ou então para evitar variações bruscas no sinal de controle, aumentando a vida útil do sistema mecânico.

Considerando-se o fato de que todo sistema real se encontra sob alguma restrição (por exemplo, limites físicos), definem-se as seguintes expressões gerais de restrição:

$$\begin{aligned} x(k+j|k) &\in \mathcal{X}, & j \in [1, N] \\ u(k+j|k) &\in \mathcal{U}, & j \in [0, N] \end{aligned}$$

onde  $\mathcal{X}$  é o conjunto convexo fechado de todos os valores possíveis para  $x$  e  $\mathcal{U}$  é o conjunto convexo fechado de todos os valores possíveis para  $u$ . Supondo que tais restrições sejam lineares em relação a  $x$  e  $u$ , pode-se escrever:

$$\mathbf{C}x(k+j|k) \leq c, \quad j \in [1, N] \quad (50)$$

$$\mathbf{D}u(k+j|k) \leq d, \quad j \in [0, N] \quad (51)$$

Assim, o problema de otimização  $\mathcal{P}(k, x(k))$ , a ser resolvido a cada instante de amostragem  $k$ , consiste em encontrar a seqüência de controle  $u^*$  e a seqüência de estado  $x^*$  tais que minimizem a função objetivo  $\Phi(k)$ , obedecendo às restrições impostas, isto é:

$$\mathcal{P}(k, x(k)) = \arg \min_{u, x} \{\Phi(k)\} \quad (52)$$

sujeito a:

$$x(k|k) = x_0 \quad (53)$$

$$x(k+j|k) = f_d(x(k+j-1|k), u(k+j-1|k)), \quad j \in [1, N] \quad (54)$$

$$\mathbf{C}x(k+j|k) \leq c, \quad j \in [1, N] \quad (55)$$

$$\mathbf{D}u(k+j|k) \leq d, \quad j \in [0, N] \quad (56)$$

onde  $x_0$  é o valor de  $x$  no instante  $k$ .

O problema de otimização (52)–(56) é resolvido para cada instante de amostragem, resultando na seqüência ótima de controle, dada por:

$$u^* = \{u^*(k|k), u^*(k+1|k), \dots, u^*(k+N|k)\} \quad (57)$$

e a seqüência ótima de estado é dada por:

$$x^* = \{x^*(k+1|k), \dots, x^*(k+N|k)\} \quad (58)$$

com um custo ótimo  $\Phi^*(k)$ . Assim, a lei de controle definida pelo MPC é implicitamente determinada pelo primeiro termo da seqüência ótima de controle:

$$h(\delta) = u^*(k|k) \quad (59)$$

onde  $h(\delta)$  é constante durante o intervalo de amostragem  $T$ .

Por fim, a Figura 21 apresenta o diagrama de blocos do esquema de controle MPC proposto nesse trabalho.

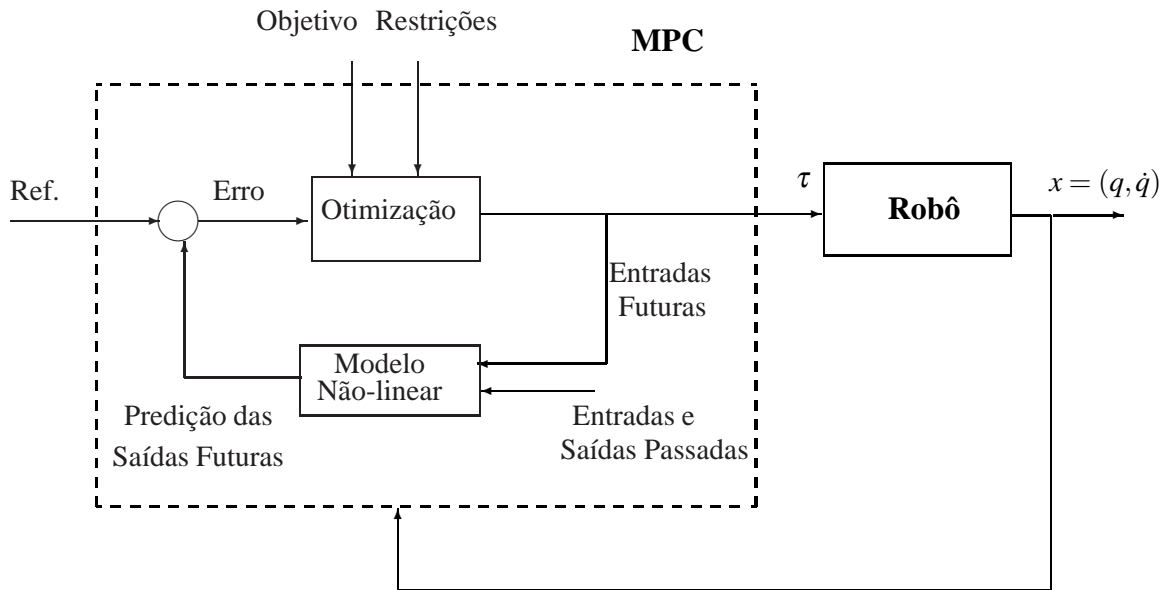


Figura 21: MPC com modelo não-linear de predição.

## 4.2 Análise de Estabilidade

Ao longo dos últimos anos, uma das técnicas avançadas de controle mais frequentemente empregadas na indústria é o MPC (ou RH), que foi projetada para tratar com problemas de otimização sujeitos a restrições. Devido ao horizonte de controle móvel, a estabilidade se torna um dos principais problemas dessa estratégia de controle. De acordo com a classe de MPC que se deseje estudar (conforme mostra a Figura 17), a análise de estabilidade é realizada de maneira diferente.

A análise de estabilidade de sistemas em malha fechada utilizando a estratégia de controle preditivo não é uma tarefa simples, devido ao fato de não haver uma expressão analítica para o sinal de controle calculado, uma vez que depende da solução ótima obtida durante a etapa de otimização em relação à função custo. Tal otimização se apresenta como um problema não convexo (para o caso não-linear), o qual pode apresentar uma solução subótima (localmente ótima) ou mesmo não ser possível encontrar uma solução para o problema. Quando empregado para o controle de sistemas lineares, tem-se um problema convexo, o qual pode ser resolvido por meio de programação quadrática, sendo possível obter expressões analíticas para a solução, com um tempo de processamento muito menor.

Considerando-se o MPC com horizonte infinito de predição é possível garantir a estabilidade, mesmo quando aplicado ao controle de sistemas não-lineares. Contudo, a carga computacional exigida para esse caso é intratável para qualquer aplicação real.



Agora, tendo em vista o caso de MPC com horizonte finito de predição, pode-se garantir a estabilidade impondo a restrição de que o estado terminal do horizonte seja nulo. Para tal restrição, além de se utilizar muito tempo de processamento para ser satisfeita, pode não ser possível encontrar uma solução que a satisfaça em um número finito de iterações.

Trabalhos mais recentes (GU; HU, 2005; MAYNE et al., 2000) mostram que a equação de restrição no estado terminal pode ser relaxada pela inclusão na função custo de um termo de ponderação do estado terminal, transformando a restrição em uma inequação, ou seja, deseja-se que o estado terminal chegue ao final do horizonte de predição dentro de uma determinada região. A condição para que seja aplicada tal relaxação é que seja possível determinar uma lei de controle qualquer linear para a região de interesse, garantindo, assim, que a trajetória do sistema se moverá para dentro da região após o horizonte finito de controle.

Vários são os trabalhos que apresentam desenvolvimentos teóricos que demonstram a estabilidade de sistemas controlados por MPC (EL-FARRA; MHASKAR; CHRISTOFIDES, 2003; JUNG; WEN, 2004; LIMÓN; ÁLAMO; CAMACHO, 2006), além de características de robustez a perturbações e incertezas paramétricas.

Maiores detalhes sobre estabilidade exponencial e a demonstração de que a função objetivo pode ser empregada como Função de Lyapunov para análise de estabilidade são apresentados em (MAYNE et al., 2000).

### 4.3 Abordagem MPC Linear

Nas seções anteriores deste capítulo apresentou-se a estratégia MPC utilizando um modelo não-linear da dinâmica do sistema para o horizonte de predição. Tal abordagem mostra-se, do ponto de vista da carga computacional exigida, muito dispendiosa devido ao fato de ter que resolver um problema de otimização não-convexa por meio de programação não-linear. Há o fato de que esses problemas apresentam um grande número de variáveis de decisão e, não raramente, é impossível encontrar um mínimo global como solução. Considerando-se o caso geral, em que tanto a função objetivo quanto as restrições podem ser funções não-lineares do estado e das entradas de controle, tem-se um problema de otimização de difícil solução.

Além dessas dificuldades apresentadas, não há um consenso sobre qual o melhor método para ser utilizado na solução desse tipo de problema. Métodos globais, como penalização e funções de contenção, apresentam o problema de grande demanda por recursos computacionais e do longo tempo para obtenção da solução. Como alternativa tem-se os métodos locais, os quais apresentam um bom desempenho quando no entorno da solução.

Devido às várias dificuldades inerentes à solução de problemas de programação não-linear e ao fato de o esquema de controle MPC requerer que o problema de otimização seja resolvido a cada período de amostragem, deve-se procurar uma implementação que garanta a obtenção da solução em um número finito de passos. É conhecimento comum que tanto programação linear quanto programação quadrática satisfazem essa condição, de obter a solução do problema em um número finito de passos. Um problema de programação quadrática é um problema de otimização em que a função objetivo é uma função quadrática e as restrições são funções lineares.

Assim, esse é o motivo pelo qual introduz-se nessa seção o desenvolvimento da versão do MPC empregando um modelo linearizado para a dinâmica durante o horizonte de predição. Essa linearização é feita a partir de um modelo para a dinâmica do erro

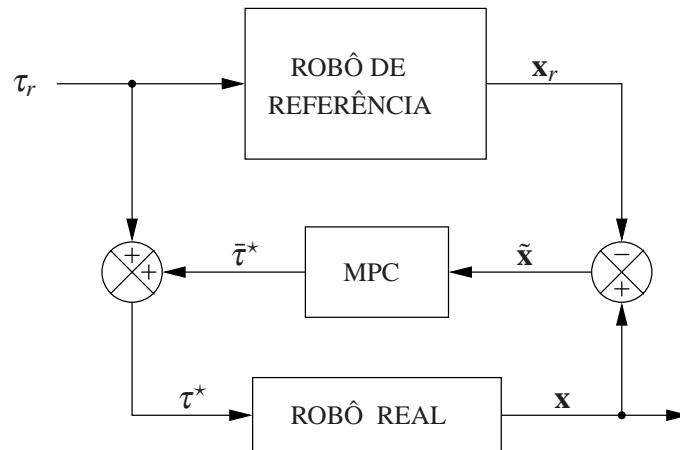


Figura 22: Robô virtual utilizado como referência.

entre a trajetória realizada pelo robô e a trajetória de referência, previamente calculada. Considera-se, em um primeiro momento, a existência de um robô virtual de referência, o qual apresenta uma dinâmica similar ao sistema real, e que será utilizado para gerar a trajetória de referência, como ilustrado na Figura 22.

Assim, seja a dinâmica do sistema virtual de referência dada por:

$$\dot{x}_r = f_r(x_r, \tau_r) \quad (60)$$

sendo  $x_r$  o vetor de estado de referência e  $\tau_r$  o vetor de torques de referência.

O diagrama de blocos completo da estratégia de controle MPC utilizando um modelo linearizado para a dinâmica do sistema durante o horizonte de predição é apresentado na Figura 23.

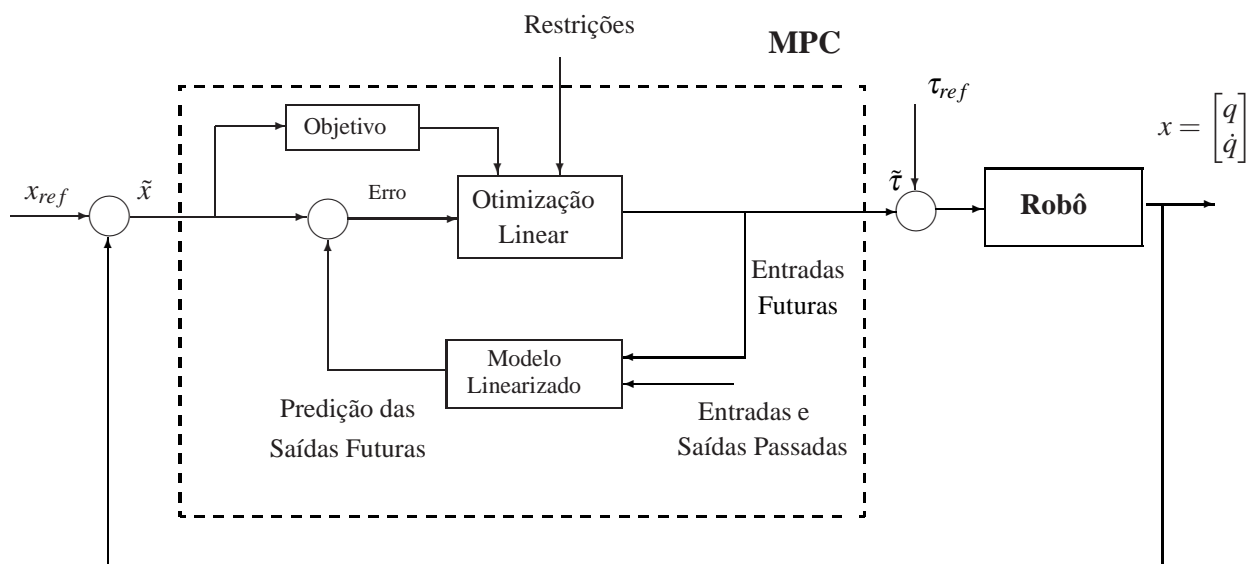


Figura 23: MPC com modelo linearizado de predição.

A idéia baseia-se na técnica de linearização sucessiva, que permite descrever o sistema não-linear através de um sistema linear variante no tempo. Considerando as entradas de controle como variáveis de decisão, é possível transformar o problema de otimização que deve ser resolvido a cada período de amostragem em um problema de programação

quadrática. Para a solução desse tipo de problema existem diversos algoritmos numéricos robustos que permitem encontrar solução ótima global.

A dinâmica linearizada para o sistema pode ser obtida expandindo-se o lado direito da equação (43) em série de Taylor em torno do ponto  $(x_r, \tau_r)$  e descartando os termos de mais alta ordem, obtém-se:

$$\dot{x} = f(x_r, \tau_r) + \left. \frac{\partial f(x, \tau)}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_r \\ \tau=\tau_r}} (x - x_r) + \left. \frac{\partial f(x, \tau)}{\partial \tau} \right|_{\substack{x=x_r \\ \tau=\tau_r}} (\tau - \tau_r) \quad (61)$$

ou

$$\dot{x} = f(x_r, \tau_r) + \mathbf{F}_{x,r}(x - x_r) + \mathbf{F}_{\tau,r}(\tau - \tau_r) \quad (62)$$

onde  $\mathbf{F}_{x,r}$  e  $\mathbf{F}_{\tau,r}$  são os jacobianos de  $f$  com relação a  $x$  e com relação a  $\tau$ , respectivamente, avaliada no ponto de referência  $(x_r, \tau_r)$ .

Agora, subtraindo (60) de (62) tem-se:

$$\dot{\tilde{x}} = \mathbf{F}_{x,r}\tilde{x} + \mathbf{F}_{\tau,r}\tilde{\tau} \quad (63)$$

onde  $\tilde{x} \triangleq x - x_r$  é o erro de seguimento da referência e  $\tilde{\tau} \triangleq \tau - \tau_r$  é a variação associada à entrada de controle.

A discretização de (63) pode ser obtida utilizando-se o método das diferenças finitas, resultando em:

$$\tilde{x}(k+1) = \mathbf{A}(k)\tilde{x}(k) + \mathbf{B}(k)\tilde{\tau}(k) \quad (64)$$

com

$$\mathbf{A}(k) = \mathbf{I}_{n \times n} + T\mathbf{F}_{x,r}(k) \quad (65)$$

$$\mathbf{B}(k) = T\mathbf{f}_{\tau,r}(k) \quad (66)$$

Considerando o sistema linear do erro (64), torna-se possível considerar o problema de otimização como um problema de otimização linear e, portanto, que pode ser resolvido por meio de programação quadrática. Assim, define-se os seguintes vetores:

$$\bar{x}(k+1) = \begin{bmatrix} \tilde{x}(k+1|k) \\ \tilde{x}(k+2|k) \\ \dots \\ \tilde{x}(k+N|k) \end{bmatrix}$$

$$\bar{\tau}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{\tau}(k|k) \\ \tilde{\tau}(k+1|k) \\ \dots \\ \tilde{\tau}(k+N-1|k) \end{bmatrix}$$

A função objetivo pode ser apresentada como:

$$\Phi(k) = \bar{x}^T(k+1)\bar{\mathbf{Q}}\bar{x}(k+1) + \bar{\tau}^T(k)\bar{\mathbf{R}}\bar{\tau}(k) \quad (67)$$

com

$$\bar{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{Q} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{Q} \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{R} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{R} \end{bmatrix}$$

É possível reescrever a equação (64) na forma:

$$\bar{\mathbf{x}}(k+1) = \bar{\mathbf{A}}(k)\bar{\mathbf{x}}(k) + \bar{\mathbf{B}}(k)\bar{\boldsymbol{\tau}}(k) \quad (68)$$

onde  $\bar{\mathbf{A}}(k)$  e  $\bar{\mathbf{B}}(k)$  são dados por:

$$\bar{\mathbf{A}}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(k|k) \\ \mathbf{A}(k+1|k)\mathbf{A}(k|K) \\ \vdots \\ \alpha(k, 2, 0) \\ \alpha(k, 1, 0) \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{B}}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{B}(k|k) & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{A}(k+1|k)\mathbf{B}(k|k) & \mathbf{B}(k+1|k) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha(k, 2, 0)\mathbf{B}(k|k) & \alpha(k, 2, 2)\mathbf{B}(k+1|k) & \dots & 0 \\ \alpha(k, 1, 0)\mathbf{B}(k|k) & \alpha(k, 1, 0)\mathbf{B}(k+1|k) & \dots & \mathbf{B}(k+N-1|k) \end{bmatrix}$$

com

$$\alpha(k, j, l) = \prod_{i=N-j}^l \mathbf{A}(k+1|k)$$

Considerando as equações (67) e (68), após manipulação algébrica, é possível reescrever (45) como:

$$\bar{\Phi}(k) = \frac{1}{2}\bar{\boldsymbol{\tau}}^T \mathbf{H}(k)\bar{\boldsymbol{\tau}}(k) + f^T(k)\bar{\boldsymbol{\tau}}(k) + g(k) \quad (69)$$

com

$$\mathbf{H}(k) \triangleq 2(\bar{\mathbf{B}}^T(k)\bar{\mathbf{Q}}\bar{\mathbf{B}}(k) + \bar{\mathbf{R}})$$

$$f(k) \triangleq 2(\bar{\mathbf{B}}^T(k)\bar{\mathbf{Q}}\bar{\mathbf{A}}(k)\bar{\mathbf{x}}(k|k))$$

$$g(k) \triangleq \bar{\mathbf{x}}(k|k)\bar{\mathbf{A}}^T(k)\bar{\mathbf{Q}}\bar{\mathbf{A}}(k)\bar{\mathbf{x}}(k|k)$$

O termo quadrático é descrito pela matriz Hessiana positiva definida  $\mathbf{H}(k)$ , a parte linear é descrita pelo vetor  $f(k)$  e o termo  $g(k)$ , que é independente de  $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ , pode ser ignorado

para o problema de otimização. Além disso, pode-se redefinir a função objetivo como sendo:

$$\bar{\Phi}'(k) = \frac{1}{2} \bar{\tau}^T \mathbf{H}(k) \bar{\tau}(k) + f^T(k) \bar{\tau}(k) \quad (70)$$

colocando-a na forma padrão utilizada em problemas de QP (programação quadrática).

A principal vantagem de expressar o problema de minimização na forma quadrática padrão é permitir a utilização de algoritmos de programação quadrática, uma vez que tais algoritmos são muito eficientes e, ademais, existem vários pacotes computacionais disponíveis para a solução deste tipo de problema.

A estratégia de controle preditivo baseado em modelo está baseada na suposição de que, para um pequeno horizonte de predição, o comportamento do modelo de predição e o sistema real controlado serão iguais, isto é, para que tal situação aconteça, é necessário que a diferença de comportamento entre as duas dinâmicas, tanto do modelo de predição quanto do sistema real, seja a mínima possível.

Assim, o problema de otimização a ser resolvido a cada período de amostragem é dado por:

$$\tilde{\tau}^* = \arg \min_{\tilde{\tau}} \{ \bar{\Phi}'(k) \} \quad (71)$$

sujeito a:

$$\mathbf{D} \tilde{\tau}(k+j|k) \leq d, \quad j \in [0, N-1] \quad (72)$$

De acordo com a função objetivo (69), a única variável de decisão para o problema de otimização (71) a ser resolvido é a variável de controle  $\tilde{\tau}$ . Obviamente, para qualquer sistema real as entradas de controle estão sujeitas a limites físicos. Com o intuito de evitar grandes diferenças entre as dinâmicas do modelo e do sistema real, tais restrições devem ser consideradas para o cômputo do sinal de controle durante o procedimento de otimização.

Definem-se as restrições a partir dos limites máximo e mínimo para as variáveis de controle:

$$\tilde{\tau}_{min} \leq \tilde{\tau} \leq \tilde{\tau}_{max} \quad (73)$$

Como a variável livre no processo de otimização é a variável  $\tilde{\tau}$ , a expressão (51) deve ser reescrita sob a forma:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} \end{bmatrix} \tilde{\tau} \leq \begin{bmatrix} \tilde{\tau}_{max} \\ -\tilde{\tau}_{min} \end{bmatrix}$$

$$\tau_{min} - \tau_r(k+j) \leq \tilde{\tau}(k+j) \leq \tau_{max} - \tau_r(k+j)$$

Observa-se que o estado de predição é descrito em função da seqüência ótima a ser computada, é fácil mostrar que as restrições de estado também podem ser descritas genericamente pela expressão (72). Além disso, pode-se formular da mesma forma restrições na taxa de variação das entradas de controle e estado.

A utilização da estratégia de controle MPC com modelo linearizado para predição torna mais fácil, do ponto de vista computacional, a obtenção da solução do problema de otimização, o qual agora torna-se um problema de otimização linear. Entretanto, a análise de estabilidade torna-se uma tarefa muito mais complexa devido à diferença entre o modelo considerado e o sistema real a ser controlado. Sabe-se que a dinâmica de um modelo não-linear e a dinâmica do modelo linearizado em torno de um ponto de equilíbrio convergem localmente entretanto, embora se esteja realizando a linearização em torno de pontos transitórios (pontos que não são de equilíbrio), as trajetórias não-linear e linear podem

estar bastante próximas uma da outra se o período de amostragem for suficientemente pequeno (OLIVEIRA KOTHARE; MORARI, 2000).

## 5 IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

No Capítulo 4 foi apresentada a abordagem de controle preditivo baseado em modelo não-linear (NMPC) e, também, a abordagem de controle preditivo baseado em modelo linear (LMPC), que emprega um modelo linearizado durante o horizonte de predição. No Capítulo 3 foram expostas várias estratégias de controle utilizadas em diferentes trabalhos para o controle de robôs bracejadores, para a realização de diferentes movimentos.

Apesar dessas diversas estratégias de controle conseguirem fazer com que o robô bracejador realize o movimento, cada estratégia de controle é empregada somente para uma tarefa específica, não sendo apresentadas situações em que a mesma estratégia seja ajustada, de maneira direta e simples, de tal modo que fosse possível permitir que o robô bracejador executasse mais de um tipo de movimento.

Além dessa dificuldade em se realizar diferentes tipos de movimento, os vários esquemas de controle não levam em consideração, durante o cálculo do sinal de controle, as diversas restrições que estão presentes, sejam restrições estruturais, por exemplo a característica de não-atuação e torque máximo de cada motor ou, então, restrições impostas, no caso de deslocamento e velocidade angular máximos de cada junta.

Outra característica comum às diversas abordagens apresentadas para o controle de robôs bracejadores é o fato de não apresentarem aspectos de otimalidade no procedimento de obtenção da solução do problema de controle

Diante das limitações expostas acima apresentadas pelas diversas estratégias de controle, nessa seção apresentam-se diferentes simulações que permitem avaliar e validar a aplicação da estratégia de controle preditivo baseado em modelo (MPC) para o controle do robô bracejador apresentado no Capítulo 2. Diferentemente das outras abordagens de controle para robôs bracejadores, a estratégia MPC permite tratar, de maneira direta, as várias restrições a que o sistema a ser controlado possui e, também, possibilita a obtenção de uma solução ótima, ou mesmo subótima, para o problema de minimização da função objetivo, o que gera uma lei de controle ótima, ou mesmo subótima.

Os resultados contidos na seção 5.2.1 a seguir são referentes à utilização do MPC não-linear tendo como referência um ponto fixo. Em seguida, na seção 5.2.2 apresentam-se os resultados da aplicação do MPC não-linear utilizando-se uma trajetória de referência a ser percorrida. Já na seção 5.2.3 têm-se os resultados para a simulação do MPC empregando modelo linearizado para o horizonte de predição, sendo o objetivo o seguimento de uma trajetória de referência.

Além dessas simulações, que permitem verificar a aplicabilidade da estratégia MPC para o controle de robôs bracejadores, nas seções subseqüentes apresentam-se duas diferentes situações que corroboram a capacidade do MPC não-linear para o controle do robô subatuado na execução do movimento de bracejamento. Na seção 5.2.4 mostram-se os resultados referentes à simulação da situação em que o robô bracejador não obtém êxito na

execução do movimento e falha ao tentar atingir a linha horizontal na primeira tentativa. Após realizar um movimento de *swing*, o robô bracejador consegue realizar o movimento completo.

A segunda situação consiste simplesmente na alteração das restrições relacionadas às variáveis de estado a fim de permitir que o robô bracejador possa executar o movimento de bracejamento por *over-hand*, no qual os braços do robô se movimentam por cima do corpo e não por baixo, como no caso convencional de bracejamento com *under-swing*.

Por último, nas seções 5.3.1 e 5.3.2, apresentam-se os resultados referentes às simulações das abordagens MPC não-linear e com modelo linearizado, acima apresentadas, com a diferença de se apresentar aspectos de tempo real. A partir da análise do tempo requerido para a obtenção do sinal de controle com relação ao período de amostragem, se poderá avaliar a viabilidade de implementação prática dessa estratégia de controle.

## 5.1 Controle do Robô Bracejador

O modelo dinâmico apresentado no Capítulo 2 (equação (6)), é reescrito aqui na forma de espaço de estado, a saber:

$$\dot{x}(t) = f(x) + g(x)u \quad (74)$$

onde  $x = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3]^T$  é o vetor de estado,

$$f(x) = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ -\mathbf{M}^{-1}(x) [\mathbf{V}(x)\dot{\theta} + \mathbf{G}(x) + F_v(x)] \end{bmatrix} \quad (75)$$

e

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}(x)\mathbf{B} \end{bmatrix} \quad (76)$$

De acordo com as equações do esquema NMPC apresentado, faz-se necessário descrever a dinâmica do sistema (74) de forma discreta. Assim, o sistema contínuo pode ser discretizado empregando-se o método de Euler, assumindo a seguinte forma:

$$x(k+1) = x(k) + T[f(k) + g(k)u(k)] \quad (77)$$

sendo  $T$  o período de amostragem.

As restrições do sistema descritas por (50) e (51) são consideradas sob a forma:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} \theta_{max} \\ \dot{\theta}_{max} \\ \theta_{max} \\ \dot{\theta}_{max} \end{bmatrix}$$

e

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} \tau_{max} \\ \tau_{max} \end{bmatrix}$$

sendo  $\tau_{max}$  o torque máximo dos atuadores,  $\theta_{max}$  o deslocamento angular máximo e  $\dot{\theta}_{max}$  a velocidade angular máxima das juntas.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos em simulação para o robô bracejador mostrado na Figura 24, com atuação nas juntas 2 e 3. Para cada simulação, serão definidos os valores dos limites impostos pelas restrições e os parâmetros ajustados do controlador MPC empregado.

Na Tabela 2 são definidos os parâmetros da dinâmica do robô utilizados:



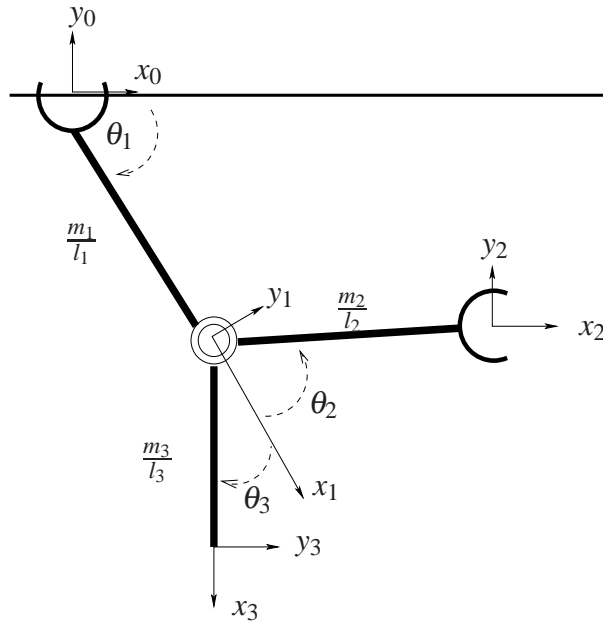


Figura 24: Robô bracejador utilizado nas simulações.

Tabela 2: Parâmetros da dinâmica do robô.

Parâmetro	Unidade	Elo 1	Elo 2	Elo 3
Massa	Kg	3,5	3,5	10,0
Comprimento	m	0,64	0,64	0,85
Atrito Viscoso	Nm/(rad/s)	0,02	0,02	0,14
Atrito de Coulomb	Nm/rad	0,02	0,02	0,45

## 5.2 Simulação

Antes de se apresentar efetivamente os resultados alcançados, é importante caracterizar-se as condições do ambiente computacional em que as simulações propostas nesse trabalho foram realizadas.

As simulações discutidas nas seções 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3, 5.2.4 e 5.2.5 foram implementadas utilizando-se o *software* Matlab<sup>®</sup> v7.4.0.336 (R2007a), executado em um processador Intel<sup>®</sup> Centrino Core2 Duo 1.8GHz. Na seção 5.3, mostram-se os resultados de simulação em tempo-real.

Para o caso das implementações referentes ao MPC não-linear foi utilizada a função `fmincon` para a resolução do problema de otimização não-linear. Já para o caso das simulações referentes ao MPC com modelo linearizado, utilizou-se a função `quadprog` para a solução do problema de otimização linear.

Nas simulações exibidas nas seções (5.2.1) a (5.2.5) considera-se a seguinte função objetivo a ser minimizada::

$$\Phi(k) = \sum_{j=1}^N x_e^T(k+j|k) \mathbf{Q}(j) x_e(k+j|k) + \quad (78)$$

$$+ \sum_{j=1}^N \tau^T(k+j-1|k) \mathbf{R}(j) \tau(k+j-1|k) + \quad (79)$$

$$+ x^T(k+N|k) \mathbf{P} x(k+N|k) \quad (80)$$

com  $\mathbf{Q}(j) = 2^{j-1}\mathbf{Q}$  de acordo com a expressão (48) anteriormente apresentada. Novamente, a variável  $x_e \triangleq x - x_r$  é a diferença entre o valor atual do estado e a posição de referência.

Para as simulações de tempo real, no entanto, optou-se por utilizar a função objetivo convencional, dada pela expressão (81), já que a função objetivo modificada requer mais tempo de computação para a solução do problema de otimização.

$$\Phi(k) = \sum_{j=1}^N x_e^T(k+j|k)\mathbf{Q}x_e(k+j|k) + \tau^T(k+j-1|k)\mathbf{R}\tau(k+j-1|k) \quad (81)$$

### 5.2.1 Simulação 1: Modelo Não-linear – Ponto de Referência

Nessa seção apresentam-se os resultados da simulação utilizando o MPC com modelo não-linear, tendo como objetivo fazer com que o robô bracejador se movimente de tal modo a atingir a linha horizontal em uma posição mais à frente, realizando o movimento de bracejamento único (*rope brachiation*, conforme classificação apresentada no capítulo 1).

A simulação ora considerada consiste em analisar o movimento realizado pelo robô bracejador a partir da posição inicial:

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{5\pi}{6} \\ -\frac{\pi}{3} \\ \frac{\pi}{3} \end{bmatrix} \quad \dot{\theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

O ponto de referência considerado é dado por:

$$X_r = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 + l_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dot{X}_r = \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

que representa a posição da garra do robô descrita em coordenadas cartesianas  $X$  e  $Y$  (com base nos eixos coordenados definidos no capítulo 2), com velocidade final ( $\dot{X}$  e  $\dot{Y}$ ) nula.

A transforma de coordenadas generalizadas para coordenadas cartesianas é dada pela expressão:

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (82)$$

A posição de referência adotada corresponde à posição do robô com os dois elos alinhados horizontalmente. Deseja-se, assim, que o robô se desloque o máximo possível na direção  $X$  e atinja a posição horizontal ( $Y = 0$ ). É evidente que o robô nunca atingirá tal posição devido às perdas por atrito, mas o objetivo é fazer uso da solução ótima (sub-ótima) a fim de verificar o comportamento do controlador na tentativa de se aproximar ao máximo dessa posição, maximizando o deslocamento horizontal, sem abrir mão da necessidade de atingir a posição horizontal  $Y = 0$ .

Para a realização dessa simulação foram utilizados como parâmetros do controlador NMPC os seguintes valores:

$$N = 5, \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,01 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,01 \end{bmatrix}, \quad P = 250$$

sendo considerado o período de amostragem igual a  $T = 0,01s$ . A dimensão da matriz  $Q$  corresponde à dimensão do vetor

Tabela 3: Valores máximo e mínimo para as variáveis (simulação 1).

Variável	Unidade	Máximo	Mínimo
$\theta_1$	rad	$\pi$	$-\pi$
$\theta_2$	rad	$\pi$	$-\pi$
$\theta_3$	rad	$\pi$	$-\pi$
$\dot{\theta}_1$	rad/s	20	-20
$\dot{\theta}_2$	rad/s	20	-20
$\dot{\theta}_3$	rad/s	20	-20
$\tau_1$	Nm	20	-20
$\tau_2$	Nm	20	-20

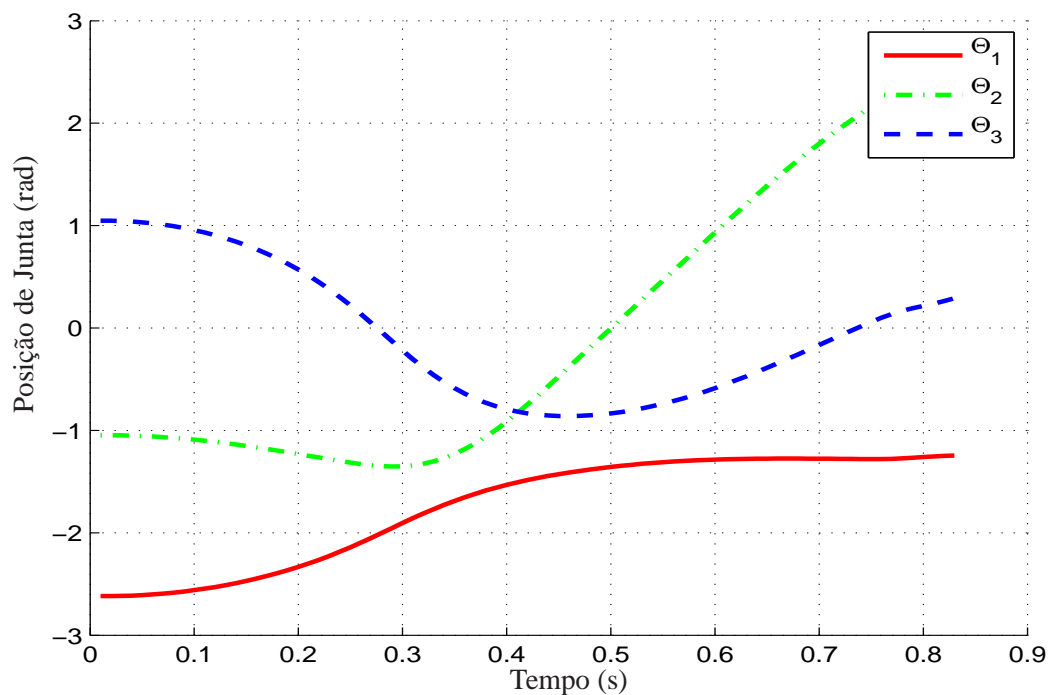


Figura 25: Posição angular de cada junta (simulação 1).

Os valores máximo e mínimo para as amplitudes de posição angular e para as amplitudes de velocidade angular de cada junta, bem como os valores limites para as entradas de controle (torques máximo e mínimo aplicáveis por cada motor) podem ser consultados na tabela 3.

Nas Figuras 25 a 28 podem ser observados os resultados obtidos pela simulação da estratégia MPC utilizando modelo não-linear, tendo como objetivo realizar um único movimento de bracejamento, a fim de atingir a linha horizontal no ponto de referência  $X_r$ . A posição angular e a velocidade angular de cada junta ao longo do movimento realizado pelo robô bracejador podem ser analisadas, respectivamente, nas Figuras 25 e 26. Ao se observar as figuras referentes à posição e velocidade de cada junta, fica evidente que os valores das variáveis não ultrapassaram os valores limites impostos pelas restrições da tabela 3. Além disso, pode-se perceber o comportamento suave de cada junta durante a realização do movimento, não havendo mudanças abruptas nos valores ao longo do movimento.

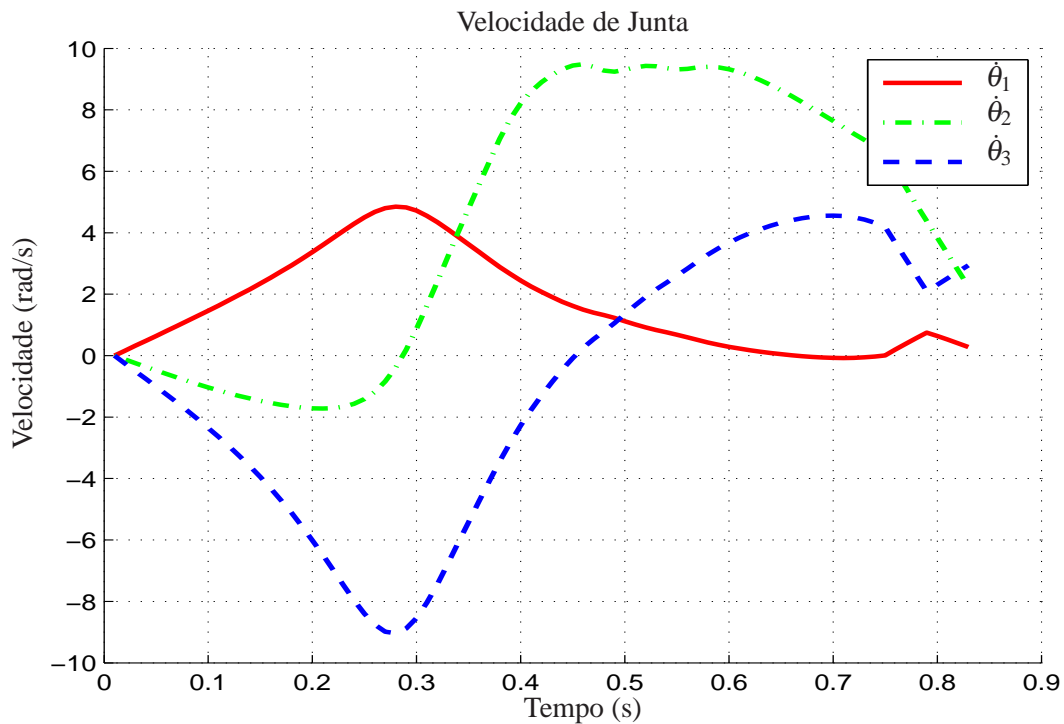


Figura 26: Velocidade angular de cada junta (simulação 1).

Na Figura 27 são mostrados os valores para os torques externos aplicados, respectivamente, às juntas 2 e 3 do robô. A partir desse gráfico é possível verificar que os valores de torque obtidos como solução do problema de otimização não-linear ficaram dentro dos limites de atuação dos motores, sendo que apenas na parte final do movimento acontece sua saturação.

Por fim, a trajetória executada pelo robô bracejador no plano vertical  $XY$  é apresentada na Figura 28, onde se verifica que o robô foi capaz de alcançar a linha horizontal de sustentação em uma posição mais à frente. Como dito anteriormente, a posição final robô não é a posição de referência apresentada ao controlador. No entanto, a lei de controle obtida realizou de maneira satisfatória o objetivo principal, o qual consiste em fazer que o robô, a partir da posição inicial, atinja a linha de sustentação em posição mais avançada.

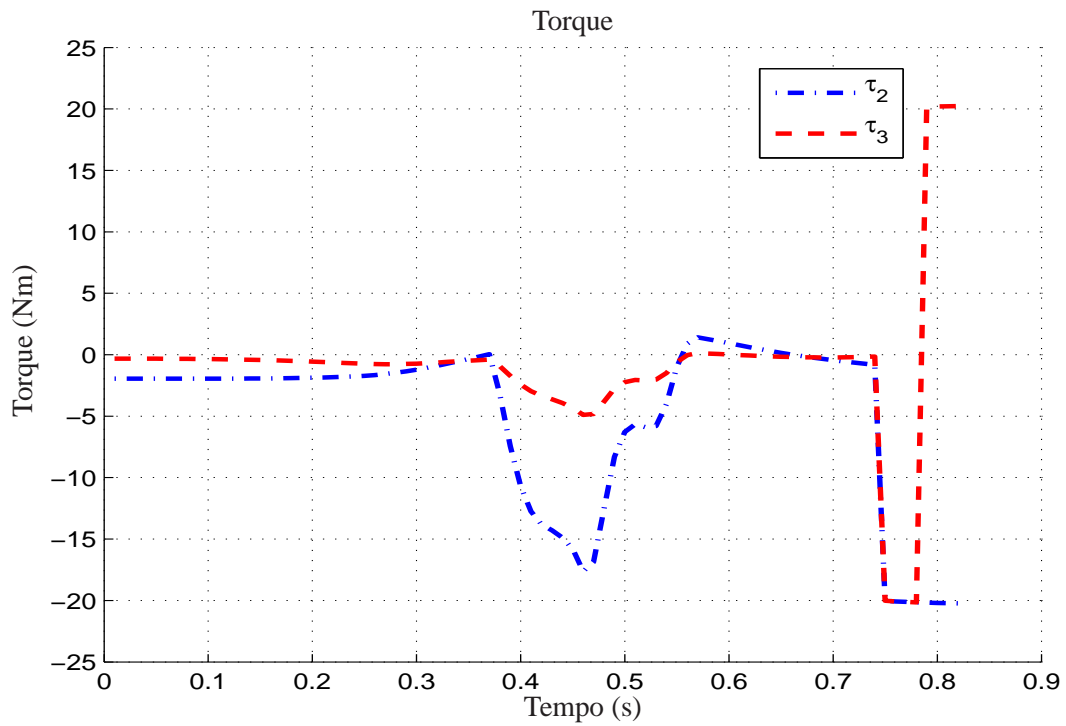


Figura 27: Torques aplicados ao robô (simulação 1).

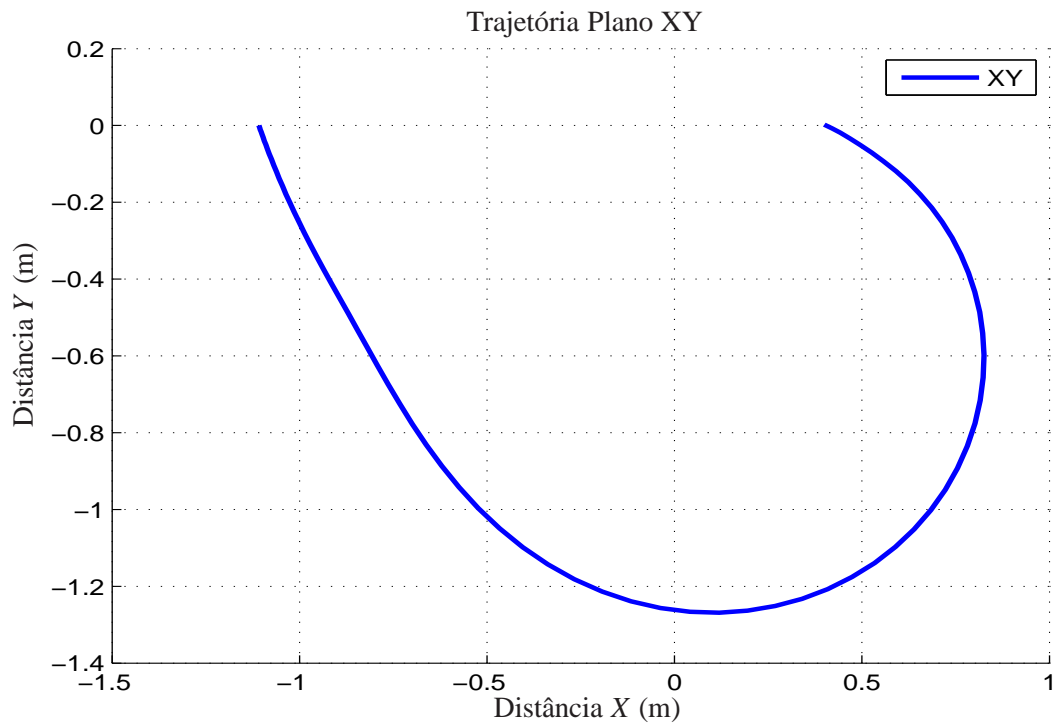


Figura 28: Trajetória XY executada pelo robô (simulação 1).

### 5.2.2 Simulação 2: Modelo Não-linear – Trajetória de Referência

Apresentam-se nesta seção os resultados obtidos a partir da simulação do esquema de controle baseado em MPC com modelo não-linear para a descrição da dinâmica do sistema durante o horizonte de predição, sendo o objetivo fazer com que o robô bracejador siga uma trajetória de referência previamente determinada.

Um aspecto importante que deve ser discutido é o modo de geração da trajetória de referência. As diferentes técnicas de geração de trajetórias comumente utilizadas no caso de robôs manipuladores completamente atuados não se aplicam quando se trata de robôs subatuados, como é o caso de robôs bracejadores considerado nesse trabalho. Deste modo, uma maneira de se obter uma trajetória de referência é utilizar a solução obtida pela simulação do MPC com modelo não-linear e adotá-la como trajetória de referência.

Outra maneira possível para se gerar a trajetória de referência consiste na execução do algoritmo MPC não-linear com um horizonte de predição longo o suficiente para gerar uma solução ótima que atinja a posição horizontal. Uma das desvantagens dessa abordagem diz respeito ao tempo excessivamente longo para a obtenção dessa trajetória de referência.

A trajetória de referência utilizada para a realização desta simulação foi obtida por meio da simulação do MPC não-linear, de maneira semelhante ao caso apresentado anteriormente na seção 5.2.1.

Diferentemente da simulação 1, a qual faz uso das coordenadas cartesianas do efetuador final do robô bracejador como variáveis de decisão, neste caso se considerou como variáveis de decisão para a função objetivo o próprio vetor de coordenadas generalizadas do robô bracejador e as entradas externas de controle. A posição inicial do robô é dada por:

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{5\pi}{6} \\ -\frac{\pi}{3} + 0.1 \\ \frac{\pi}{3} \end{bmatrix} \quad \dot{\theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Observa-se que a posição inicial ajustada para o robô bracejador não é a mesma posição inicial da trajetória de referência, justamente para mostrar que o controlador é capaz de conduzir o sistema à trajetória de referência.

Para a simulação do esquema de controle MPC não-linear para seguimento de trajetória de referência, foram aplicados os seguintes parâmetros para o controlador:

$$N = 5, \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}, \quad P = 250$$

utilizando-se o período de amostragem  $T = 0,01s$ .

Na tabela 4 são definidos os valores utilizados para as limitações impostas ao robô bracejador. Os valores impostos são diferentes dos valores utilizados na simulação 1, apresentados na tabela 3, para demonstrar a capacidade do controlador em obter a solução do problema de otimização quando na presença de alterações nos diferentes limites impostos às variáveis de decisão.

Nas Figuras 29 a 34 são mostrados os diversos resultados obtidos pela simulação do esquema de controle MPC baseado em modelo não-linear para seguimento de trajetória.

Tabela 4: Valores das restrições para as variáveis de decisão (simulação 2).

Variável	Unidade	Máximo	Mínimo
$\theta_1$	rad	0	$-\pi$
$\theta_2$	rad	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$
$\theta_3$	rad	$\pi$	$-\pi$
$\dot{\theta}_1$	rad/s	$3\pi$	$-3\pi$
$\dot{\theta}_2$	rad/s	$3\pi$	$-3\pi$
$\dot{\theta}_3$	rad/s	$3\pi$	$-3\pi$
$\tau_1$	Nm	20	-20
$\tau_2$	Nm	20	-20

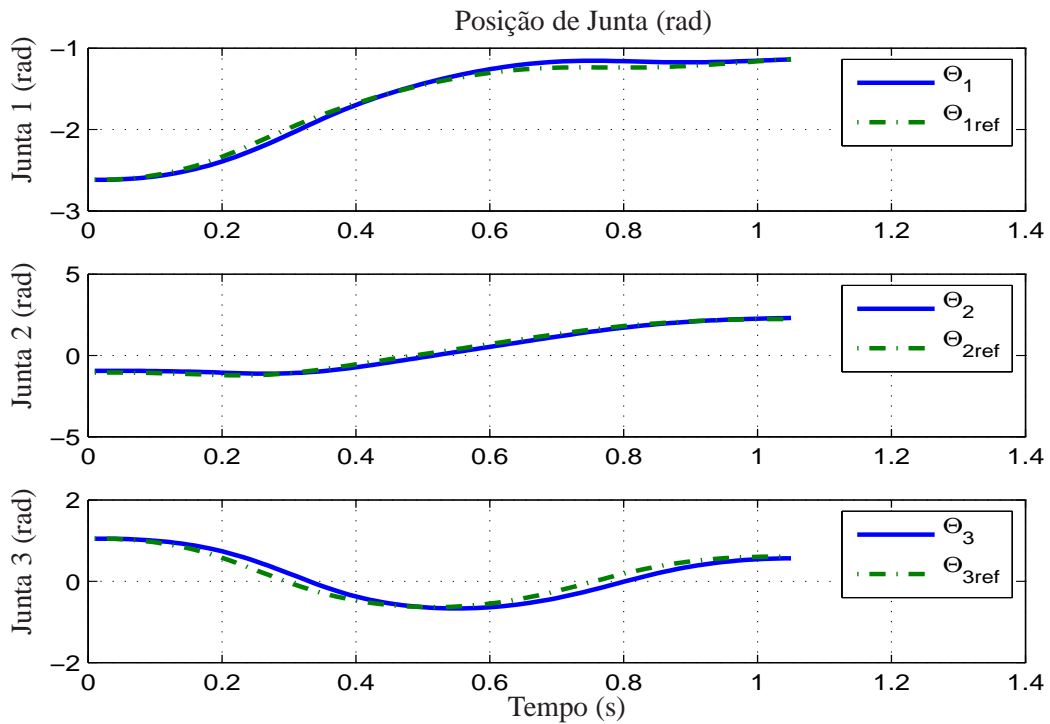


Figura 29: Posição angular (e referência) de cada junta (simulação 2).

O comportamento de cada variável de junta durante a realização do movimento de braçejamento pode ser observado, juntamente com a trajetória de referência imposta, a partir da posição angular e da velocidade angular de cada junta, as quais podem ser analisadas, respectivamente, nas Figuras 29 e 30.

Na Figura 31 tem-se os torques externos aplicados nas juntas 2 e 3 do robô braçejador, juntamente com as respectivas referências. É importante observar que, a partir da mesma posição inicial utilizada na simulação 1, mas mudando os limites das restrições impostas ao sistema, os valores calculados para o torque não atingiram o ponto de saturação, respeitando os limites das restrições. Salienta-se que, do ponto de vista prático, a não saturação dos atuadores preserva os equipamentos, aumentando sua vida útil.

As perturbações existentes entre os valores de torque aplicados e as respectivas referências podem ser visualizados na Figura 32.

A trajetória cartesiana executada pelo robô braçejador utilizando o controlador MPC não-linear, juntamente com a respectiva trajetória de referência, pode ser visualizada na

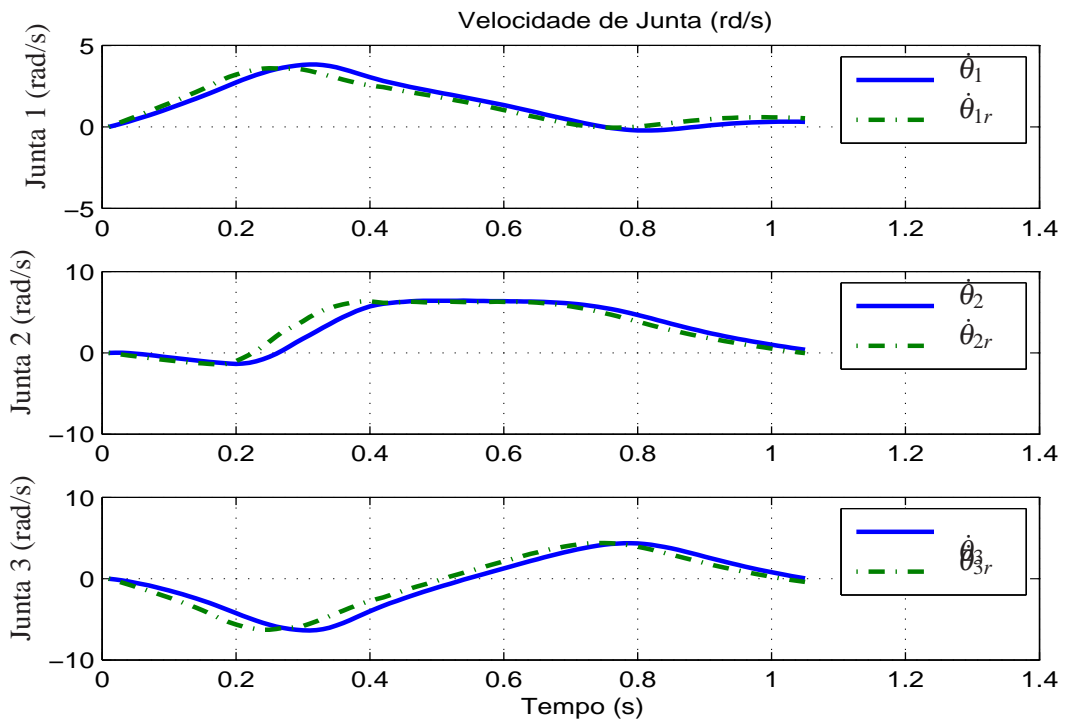


Figura 30: Velocidade angular (e referência) de cada junta (simulação 2).

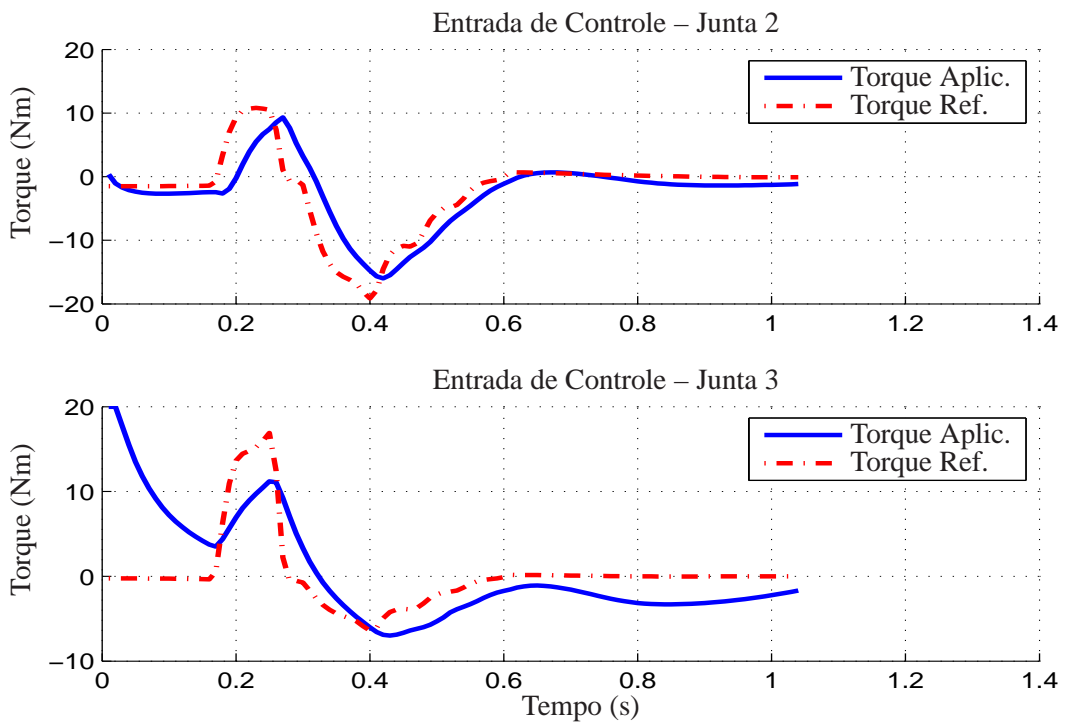


Figura 31: Torques aplicados ao robô (simulação 2).



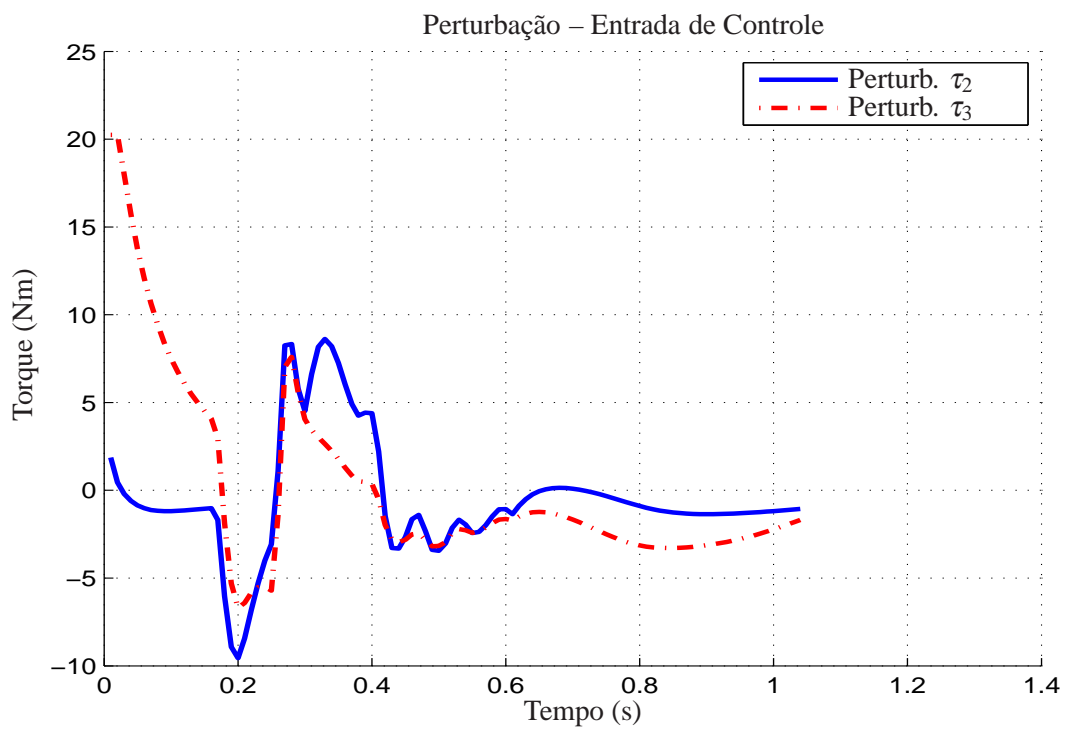


Figura 32: Perturbações de torque de entrada (simulação 2).

Figura 33. Observa-se que, embora haja uma pequena diferença entre a posição final do robô bracejador e a posição final da trajetória de referência (conforme mostrado na Figura 34), o robô foi capaz de realizar o movimento de bracejamento, buscando sempre seguir a trajetória de referência.

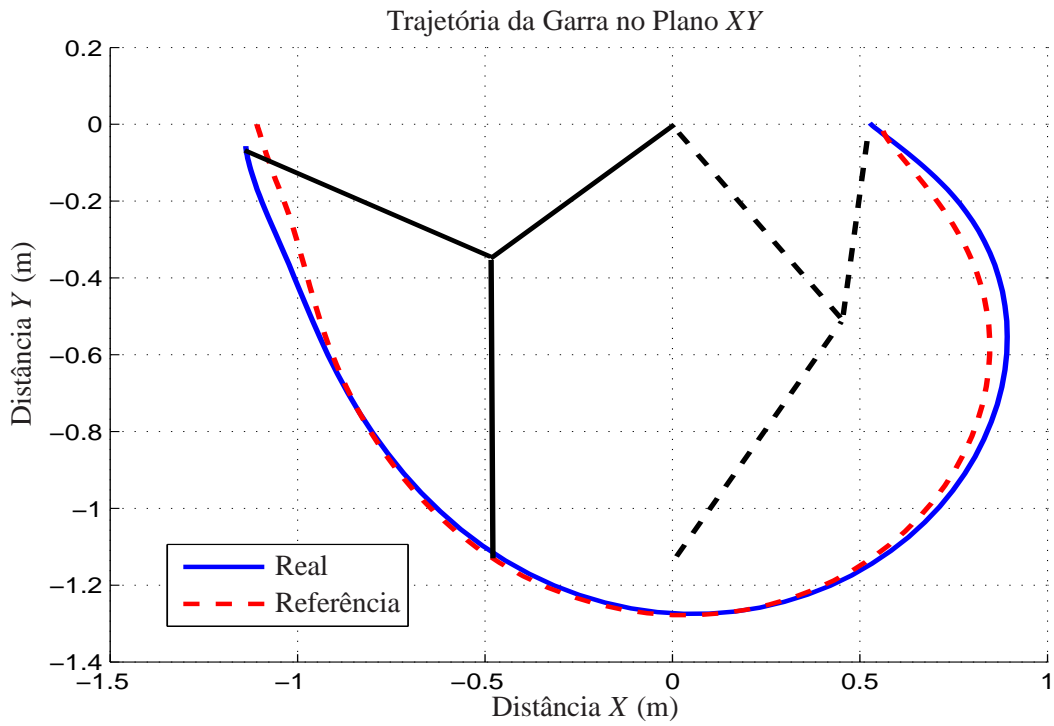


Figura 33: Trajetória  $XY$  executada pelo robô (simulação 2).

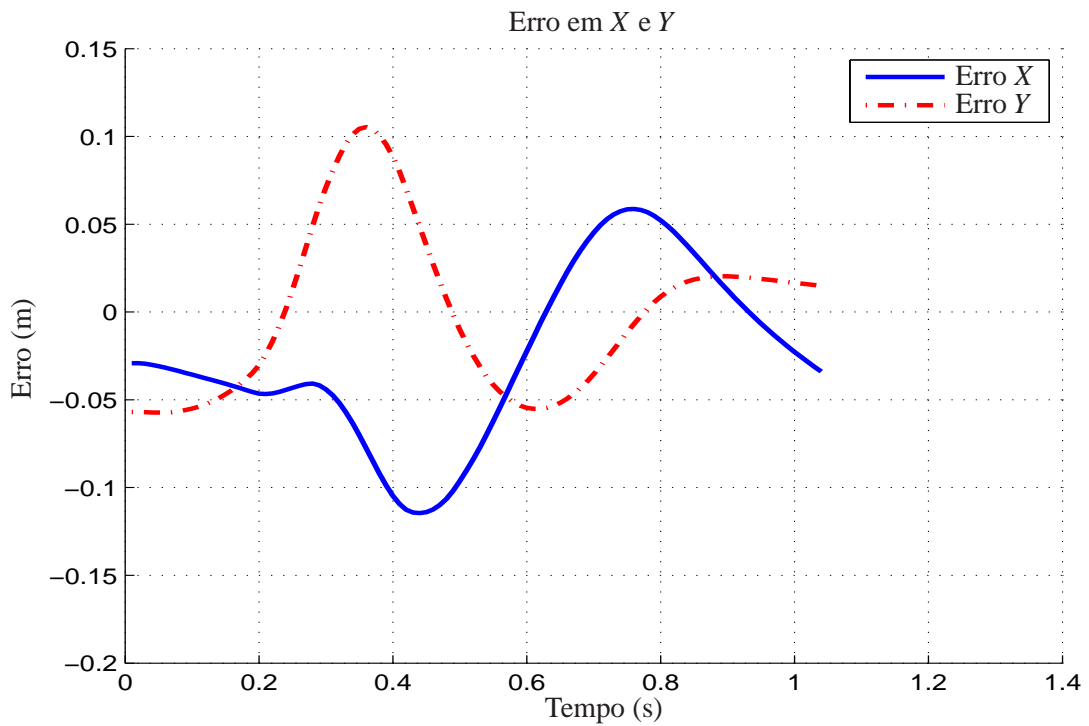


Figura 34: Erro referente às coordenadas cartesianas (simulação 2).

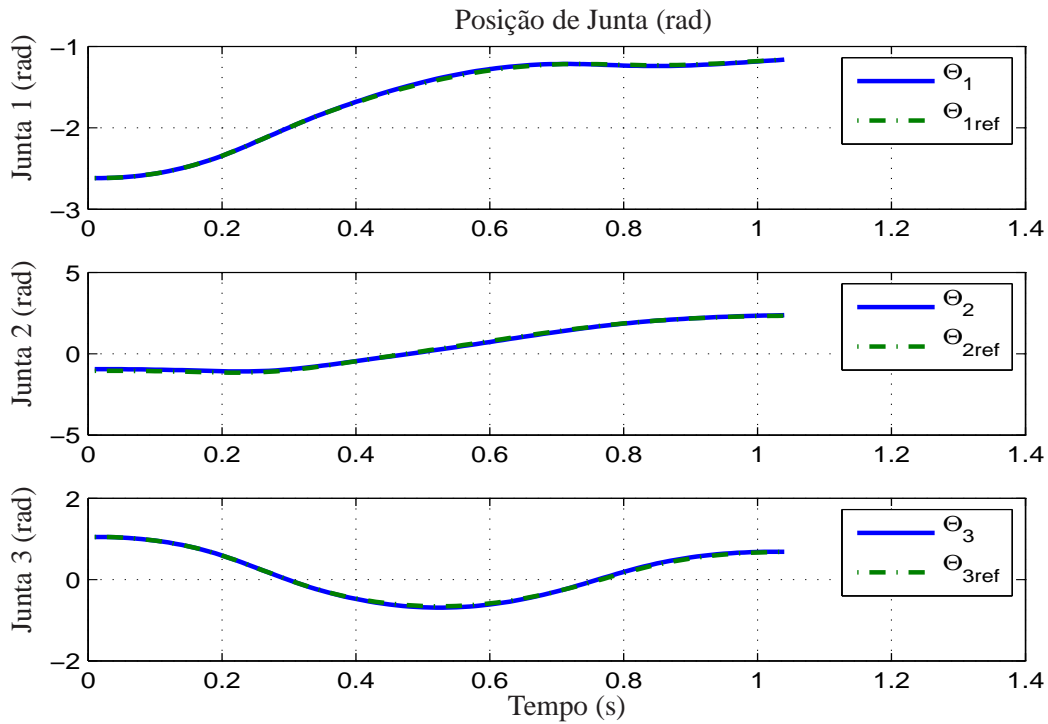


Figura 35: Posição angular (e referência) de cada junta (simulação 3).

### 5.2.3 Simulação 3: Modelo Linear – Trajetória de Referência

Nesta seção apresentam-se os resultados relacionados à simulação do esquema de controle MPC baseado em modelo linearizado no entorno de uma trajetória de referência, utilizado durante o horizonte de predição.

Novamente, adota-se as coordenadas generalizadas de junta e as entradas externas de controle como sendo as variáveis de decisão do problema de otimização linear, uma vez que agora considera-se a versão linear do MPC. Os parâmetros do controlador utilizados para a realização dessa simulação foram:

$$N = 5, \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}, \quad P = 50$$

com período de amostragem igual a  $T = 0,01s$ .

De maneira semelhante às simulações anteriores, mostram-se, nas Figuras 35 a 40 os resultados relacionados à simulação do caso linearizado. A posição e velocidade angular para cada junta, e as respectivas referências, podem ser observadas nas Figuras 35 e 36, respectivamente.

Na Figura 37 apresentam-se os torques externos aplicados ao robô e as correspondentes entradas de controle de referência. A perturbação entre os torques aplicados e os sinais de referência são mostrados na Figura 38.

A trajetória cartesiana realizada pelo robô pode ser observada na Figura 39 e o erro associado às coordenadas cartesianas  $X$  e  $Y$  são apresentadas na Figura 40.

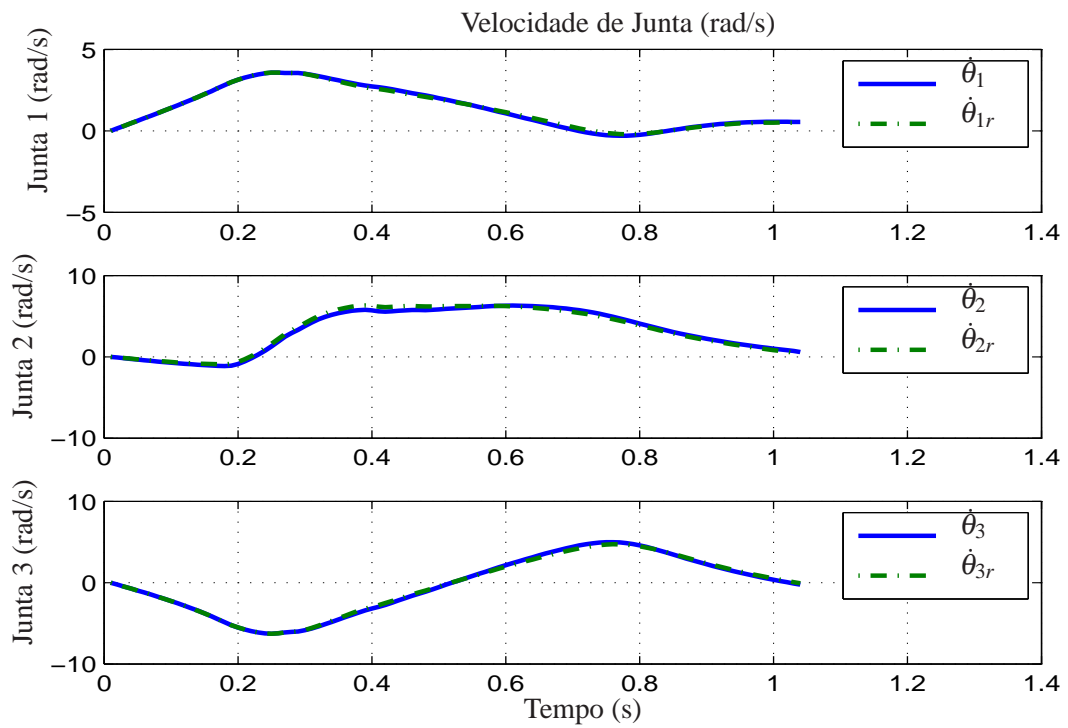


Figura 36: Velocidade angular (e referência) de cada junta (simulação 3).

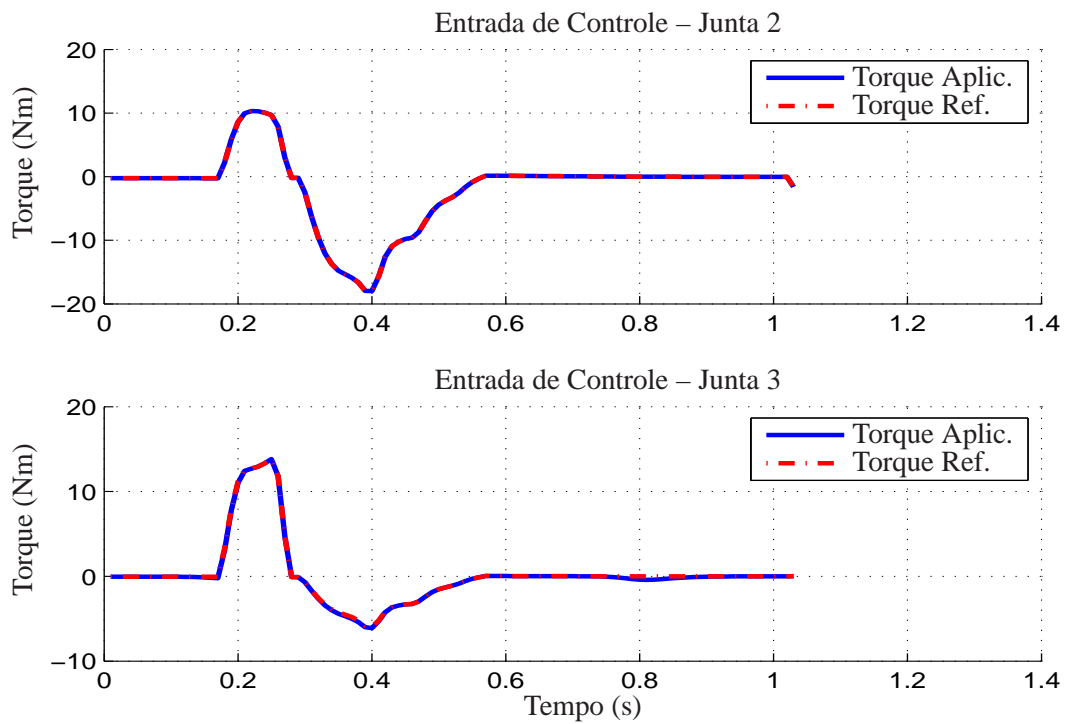


Figura 37: Torques aplicados ao robô (simulação 3).

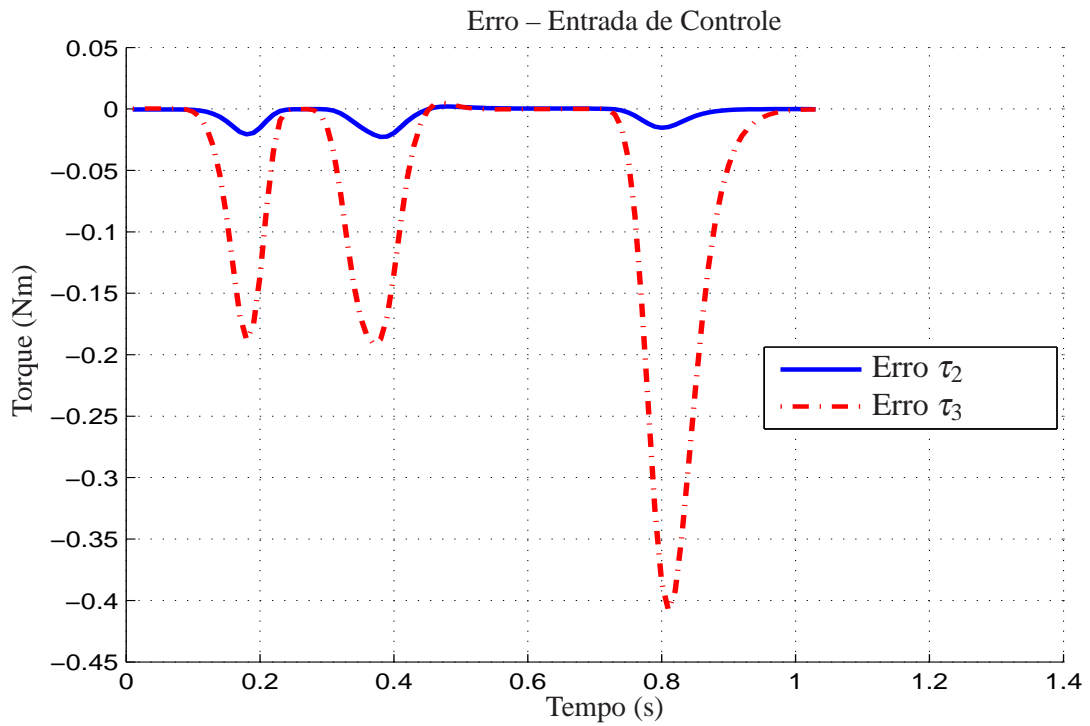


Figura 38: Perturbação no sinal de controle (simulação 3).

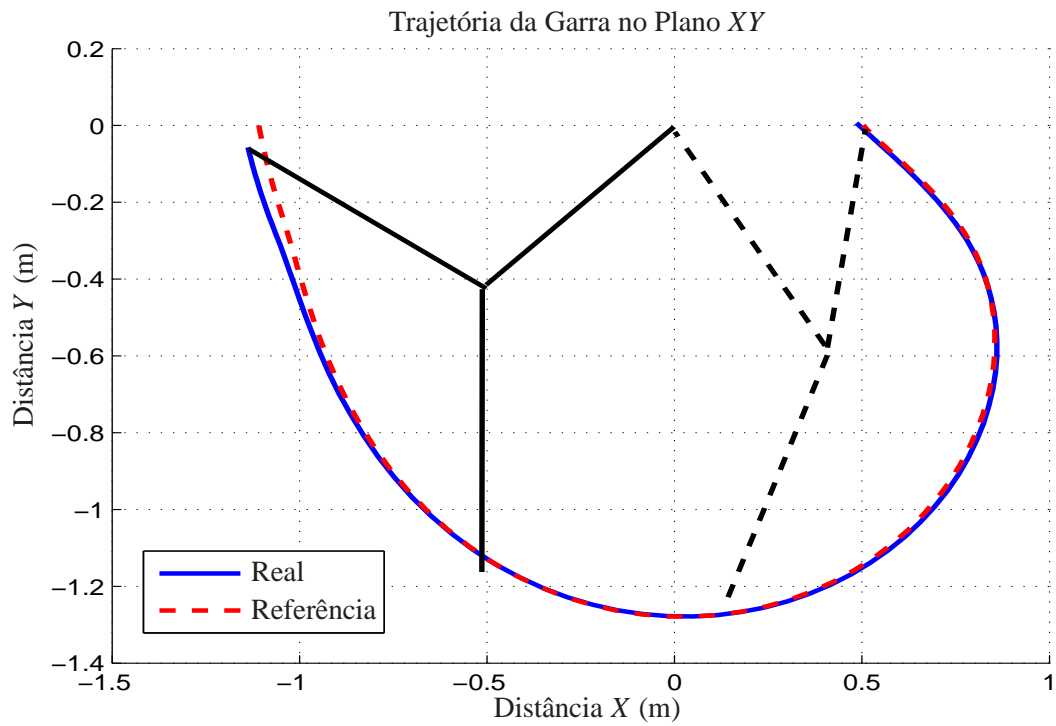


Figura 39: Trajetória XY realizada pelo robô (simulação 3).

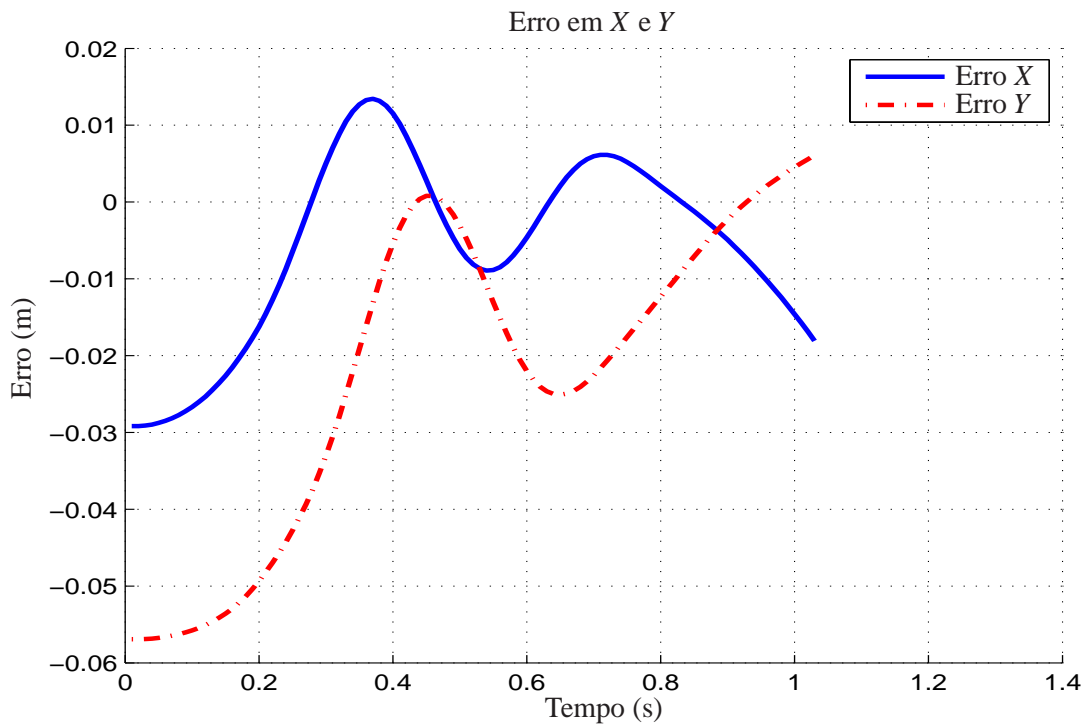


Figura 40: Erro nas coordenadas cartesianas (simulação 3).

Após serem analisados os resultados obtidos pela simulação do esquema de controle MPC baseado em modelo linearizado, que o fato de se utilizar um modelo de predição linearizado durante o horizonte de predição não afetou o desempenho do sistema em malha fechada. Nesse momento é relevante destacar que não se considera a presença de perturbações externas aplicadas ao sistema.

### 5.2.4 Simulação 4: Recuperação de Movimento

Até o presente momento foram apresentados resultados de simulações em que o robô bracejador, partindo da posição inicial, consegue completar o movimento de bracejamento, isto é, atinge a linha de sustentação, logo na primeira tentativa. Entretanto, é possível imaginar situações em que o robô não obtenha êxito em completar o movimento de bracejamento logo na primeira tentativa, sendo necessário balançar o corpo do robô com o objetivo de injetar energia no sistema e, finalmente, conseguir completar o movimento de bracejamento.

Ao contrário das diversas técnicas já desenvolvidas para o controle de robôs bracejadores, apresentadas na seção 3, as quais eram projetadas para executarem somente um tipo de movimento de bracejamento, a estratégia de controle proposta nesse trabalho para robôs bracejadores permite que o robô consiga recuperar o movimento de bracejamento, uma vez que o robô não tenha obtido êxito na primeira tentativa.

Nessa seção serão apresentados os resultados iniciais de uma situação em que o robô bracejador não obtém êxito em atingir a linha horizontal na primeira tentativa. A fim de se conseguir gerar esta situação em simulação foi utilizada a seguinte os seguintes parâmetros físicos para o robô bracejador, diferentemente dos empregados até o momento:

Tabela 5: Parâmetros da dinâmica do robô.

Parâmetro	Unidade	Elo 1	Elo 2	Elo 3
Massa	Kg	1,0	1,0	1,0
Comprimento	m	1,0	1,0	1,0
Atrito Viscoso	Nm/(rad/s)	0,01	0,01	0,01
Atrito de Coulomb	Nm/rad	0,01	0,01	0,01

Além da mudança nos valores dos parâmetros físicos do sistema, uma outra alteração que se fez necessária para gerar a situação de recuperação do movimento é fazer com que o atuador acoplado à junta 3 (junta que movimenta o corpo do robô) esteja em falha, ou seja,  $\tau_3 = 0$ .

Assim, a partir dessas alterações, os parâmetros do controlador utilizados para essa simulação são apresentados a seguir:

$$N = 5, \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 30 & 0 \\ 0 & 30 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P = 50$$

com período de amostragem igual a  $T = 0,01s$ .

Utilizou-se, nesse caso, as variáveis cartesianas do efetuador final e a entrada de controle referente à junta 2 como variáveis de decisão do problema de otimização não-linear a ser resolvido para obtenção do sinal de controle.

Resultados preliminares apresentados nas Figuras 41 a 44 demonstram, em duas diferentes situações, que a estratégia MPC pode ser facilmente empregada para a recuperação de diferentes tipos de movimento de bracejamento.

#### 5.2.4.1 Falha na Primeira Tentativa

Na primeira situação de falha a ser apresentada, o robô bracejador não consegue completar o movimento na primeira tentativa. Na continuidade do movimento, após realizar

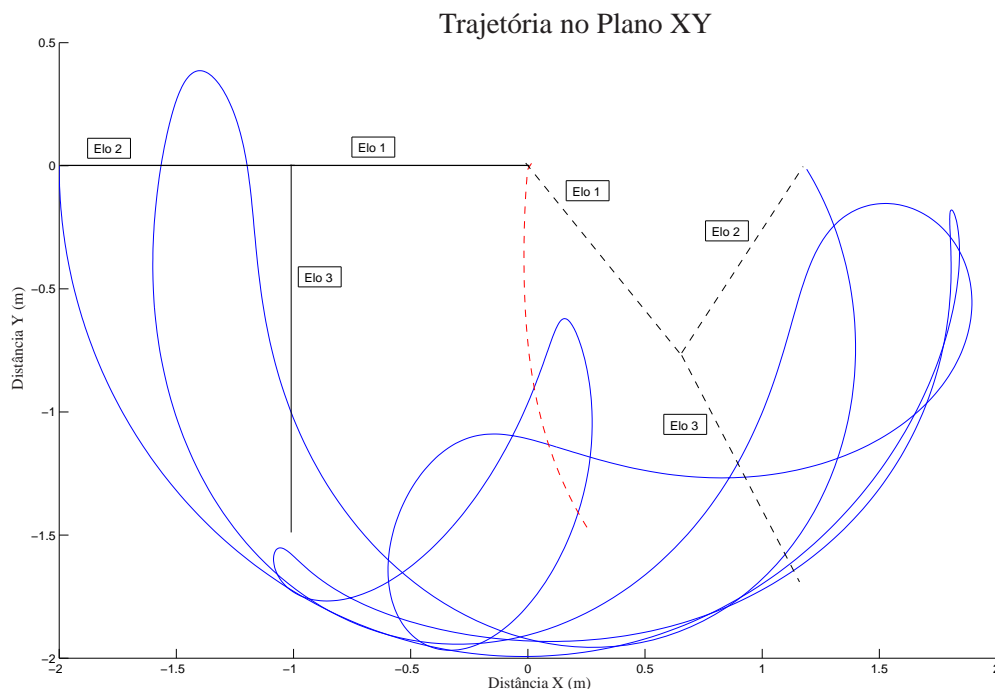


Figura 41: Trajetória realizada pelo robô durante recuperação de movimento (caso 1 – simulação 4).

uma etapa de balanço, o robô bracejador consegue atingir a linha horizontal de sustentação. A trajetória realizada pelo robô pode ser analisada na Figura 41. O torque aplicado pelo esquema de controle MPC, a ser aplicado na junta 3 (lembrando que essa é a única entrada de controle) pode ser visualizado na Figura 42.

#### 5.2.4.2 Falha na Segunda Tentativa

Já no segunda caso, o robô bracejador completa o movimento na primeira tentativa e, após tentar realizar o segundo movimento de bracejamento consecutivo, o robô não obtém sucesso. Em seguida, o robô recomeça o movimento de *swing-up* e, na continuidade, consegue completar o movimento de bracejamento. Pode se observar na Figura 43 a trajetória percorrida pelo robô bracejador para alcançar a linha de sustentação. Por fim, o torque necessário para que seja possível a realização da recuperação do segundo movimento é apresentado na Figura 44.

É importante salientar que é necessário realizar estudos mais aprofundados e detalhados sobre a recuperação de movimento de bracejamento, com o intuito de melhor entender em que situação tal fato ocorre e como se dá a influência da posição inicial do robô para que isso ocorra.

#### 5.2.5 Simulação 5: Bracejamento tipo *Over Hand*

Até o presente momento, todas as simulações apresentadas, seja utilizando o MPC com modelo não-linear ou MPC com modelo linearizado durante o horizonte de predição, considerando as restrições impostas a cada junta, mostram a realização do movimento de bracejamento denominado de *under-swing*, no qual o braço se desloca por baixo do braço de sustentação.



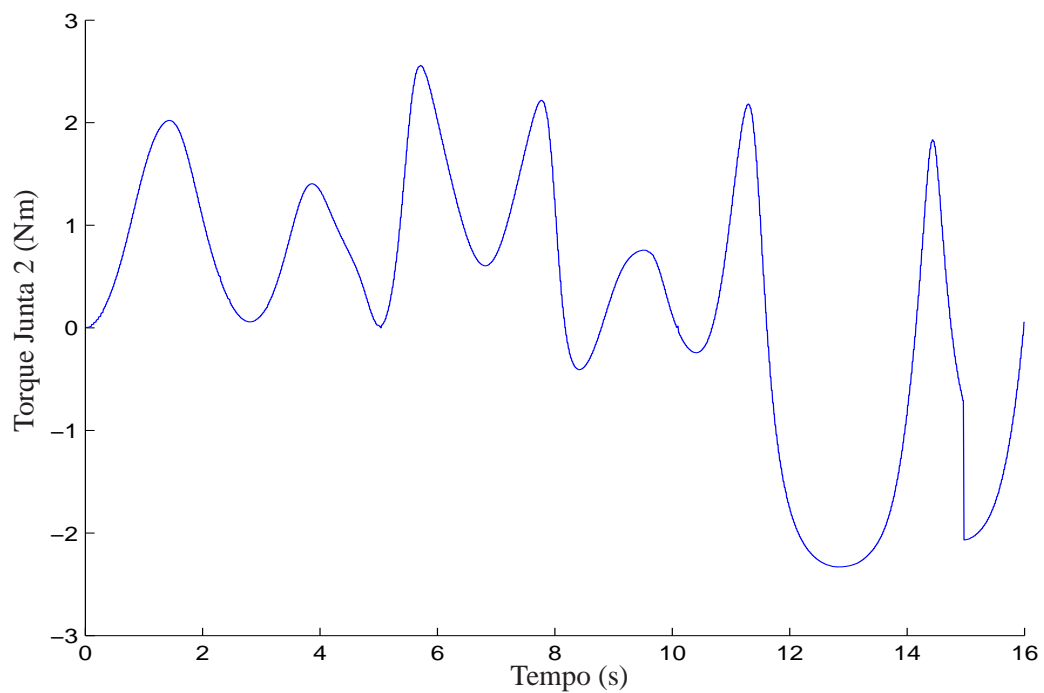


Figura 42: Torque exigido para recuperar o movimento (caso 1 – simulação 4).

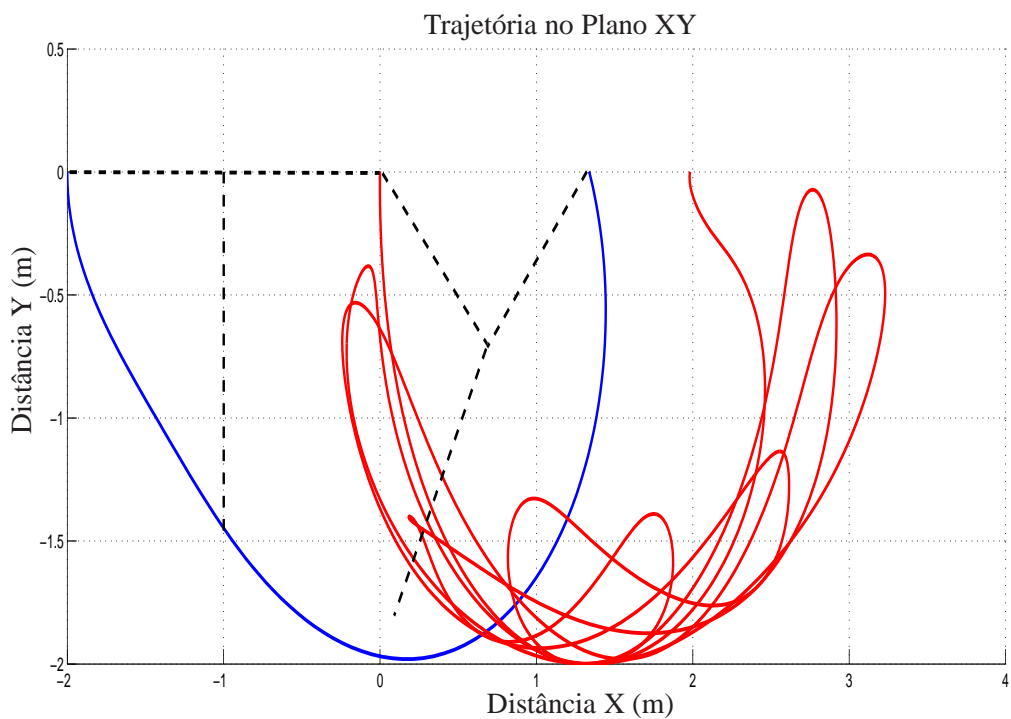


Figura 43: Trajetória realizada pelo robô durante recuperação de movimento (caso 2 – simulação 4).

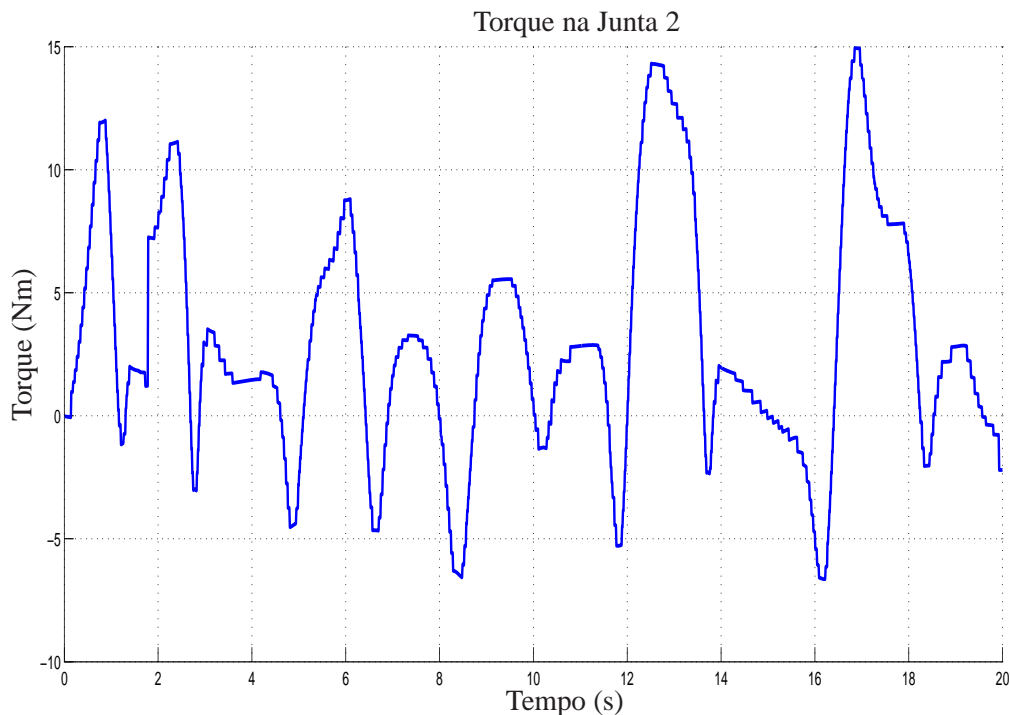


Figura 44: Torque exigido para recuperar o movimento (caso 2 – simulação 4).

Nessa seção são apresentados os resultados referentes à realização do movimento de bracejamento denominado de bracejamento por *over hand*, movimento este em que o robô desloca o braço livre lateralmente ao braço de sustentação, sem a possibilidade de executar a parte inicial de *swing-up*

Um estudo inicial foi realizado para a execução do movimento de bracejamento *over hand*. Para tanto foi empregada a abordagem MPC não-linear, sem trajetória de referência, sendo necessário somente ajustar as restrições referentes ao deslocamento angular permitido a cada junta de tal forma que o controlador foi capaz de interpretar essas novas restrições e gerar um outro tipo de bracejamento.

Não foi encontrado na bibliografia consultada, trabalhos que abordem problemas em que uma mesma estratégia de controle apresenta-se a capacidade de realizar os dois modos de bracejamento, seja bracejamento por *under-swing* ou seja bracejamento por *over hand*.

As restrições impostas para a realização do bracejamento tipo *over hand* são apresentadas na tabela 6.

Resultados preliminares apresentados nas Figuras 45 e 48 demonstram que a estratégia MPC pode ser facilmente empregada para a realização de diferentes tipos de movimento de bracejamento. Na Figura 45 pode-se observar a trajetória cartesiana realizada pelo robô bracejador; o comportamento das variáveis de junta (posição e velocidade angular) ao longo desse movimento pode ser analisado, respectivamente, nas Figuras 46 e 47.

Os torques aplicados em cada uma das juntas para a realização desse movimento de bracejamento *over hand* é apresentado na Figura 48. Observa-se que os valores limites impostos foram respeitados.

Uma das grandes questões ainda em aberto com relação ao tipo de movimento de bracejamento a ser executado pelo robô, seja *under-swing* ou seja *over-hand*, é determinar quais critérios devem ser utilizados para decidir qual o melhor movimento a ser realizado.

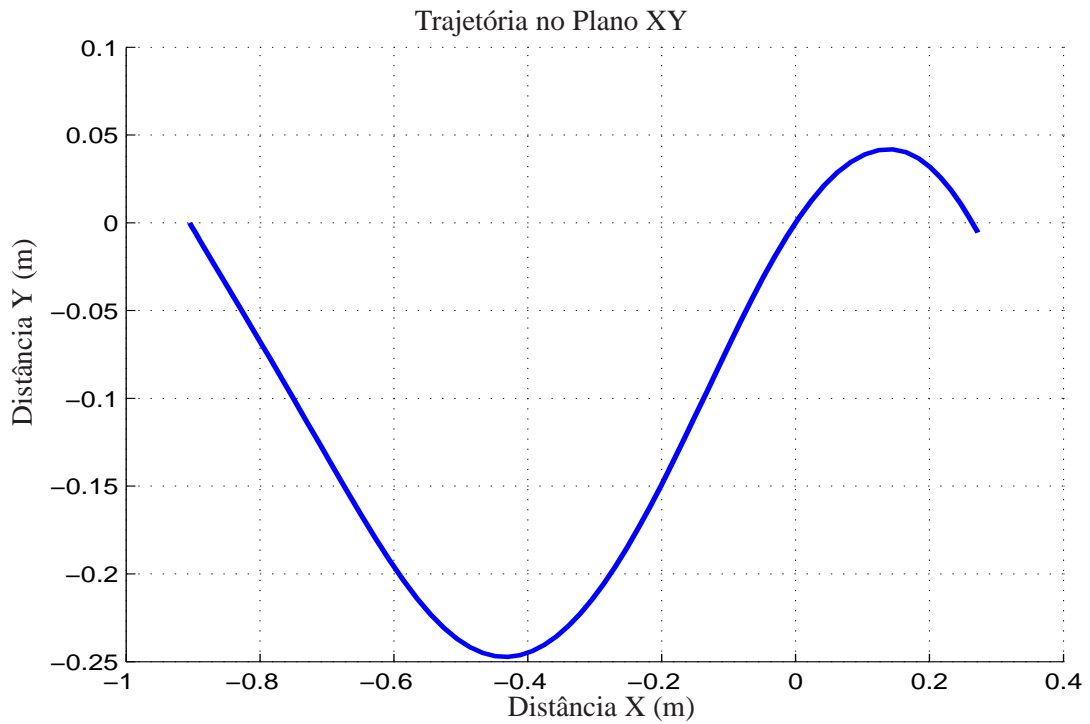


Figura 45: Trajetória cartesiana realizada pelo robô – bracejamento *over hand* (simulação 5).

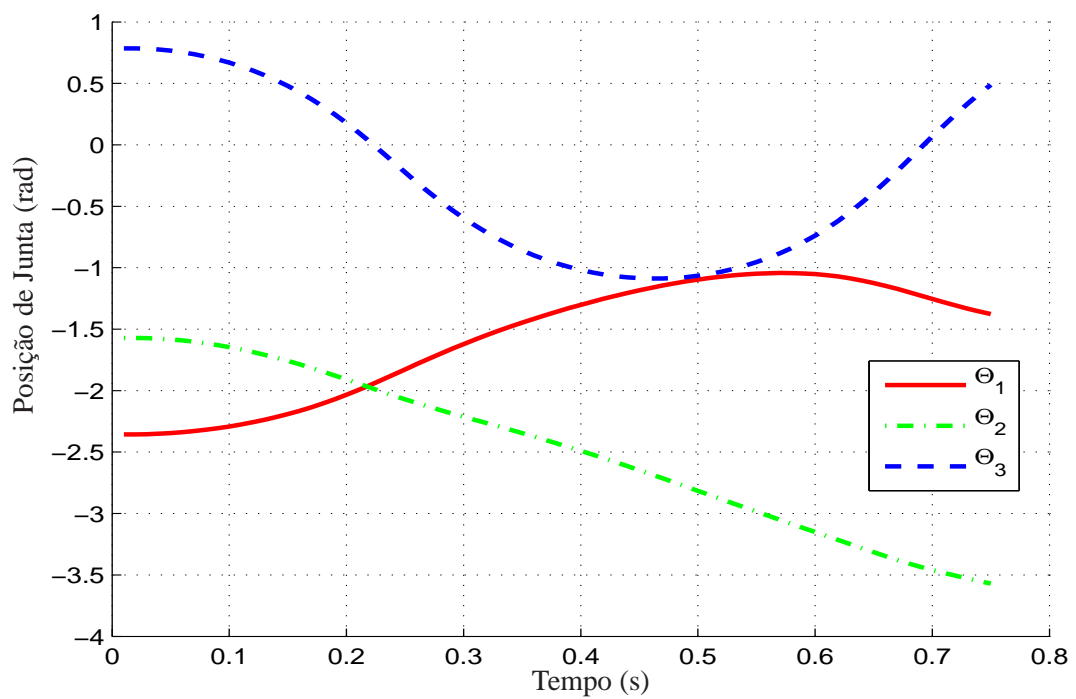


Figura 46: Posição angular – bracejamento *over hand* (simulação 5).

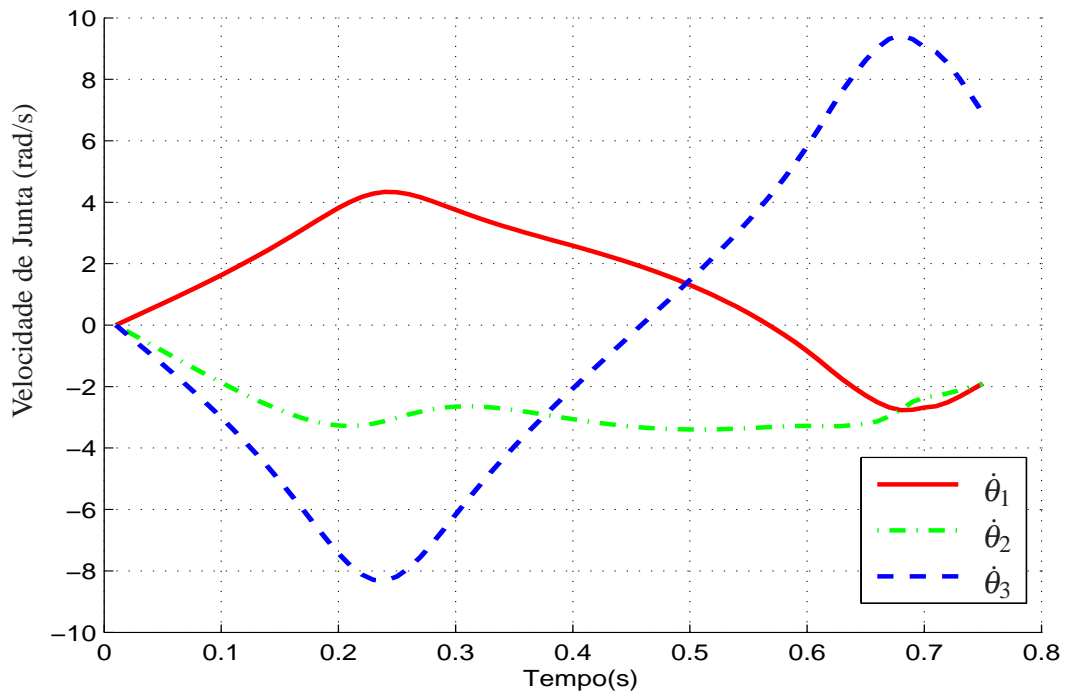


Figura 47: Velocidade angular – bracejamento *over hand* (simulação 5).

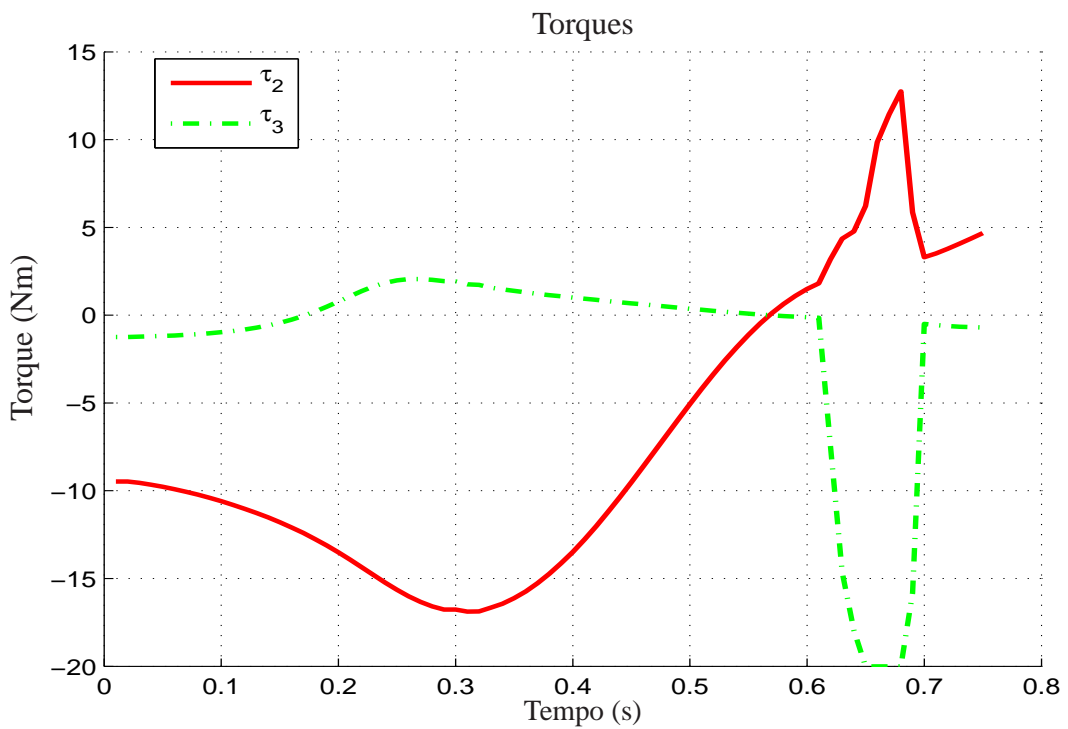


Figura 48: Torque necessário para realizar o movimento – bracejamento *over hand* (simulação 5).

Tal fato vem a demonstrar, além das justificativas já apresentadas ao longo desse trabalho, a grande dificuldade existente no controle de robôs bracejadores.

### 5.3 Implementação e Resultados em Tempo Real

Nesta seção serão apresentados os resultados da simulação realizada em tempo real, diferentemente das simulações anteriores. Para a realização das simulações em tempo-real é considerado neste trabalho a implementação do esquema de controle MPC, devendo o controlador fornecer o valor do sinal de controle em tempo inferior ao período de amostragem empregado nas simulações.

Os programas desenvolvidos para o esquema de controle MPC (tanto considerando modelo não-linear quanto modelo linearizado) foram implementados em linguagem C++ e, para garantir a precisão necessária para temporização foi utilizado o sistema RTAI (*Linux Realtime Application Interface* versão 3.6) que é uma extensão do sistema operacional Linux com a finalidade de oferecer funcionalidades de tempo real, o qual foi desenvolvido no DIAPM (*Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale - Politecnico di Milano*). O sistema consiste de um *patch* ao kernel do Linux (foi utilizada a versão 2.6.22.15), fornecendo uma camada de abstração de *hardware* e uma série de funcionalidades direcionadas a profissionais que precisem trabalhar com sistemas de tempo real.

Considerando-se o esquema de controle MPC baseado em modelo não-linear, é necessário a resolução em tempo de execução do problema de otimização não-linear. Para tal foi decidido utilizar uma versão modificada da biblioteca *donlp2* (SPELLUCCI, 1999). Originalmente, essa biblioteca foi escrita em Fortran e logo em seguida foi traduzida para o padrão ANSI C. A versão utilizada neste trabalho consiste na conversão das interfaces para o padrão C++, realizada no próprio laboratório LASCAR/UFRGS.

Já para a implementação do esquema de controle MPC utilizando modelo linearizado durante o horizonte de predição, a fim de resolver o problema de otimização quadrática foi utilizada a biblioteca OOQP (*Object-Oriented Software for Quadratic Programming*) (GERTZ; WRIGHT, 2004).

Tabela 6: Valores máximo e mínimo para as variáveis (simulação 5).

Variável	Unidade	Máximo	Mínimo
$\theta_1$	rad	0	$-\pi$
$\theta_2$	rad	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$
$\theta_3$	rad	$\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$
$\dot{\theta}_1$	rad/s	$3\pi$	$-3\pi$
$\dot{\theta}_2$	rad/s	$3\pi$	$-3\pi$
$\dot{\theta}_3$	rad/s	$3\pi$	$-3\pi$
$\tau_1$	Nm	20	-20
$\tau_2$	Nm	20	-20

Para as simulações apresentadas a seguir o robô tem a seguinte posição inicial:

$$x_0 = \begin{bmatrix} -\frac{3\pi}{4} \\ -\frac{\pi}{2} \\ \frac{\pi}{2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (83)$$

Além disso, para a realização das simulações foi utilizado um computador com processador Intel(R) Core(TM)2 CPU T5600 1.83GHz, sendo que, mesmo empregando-se um sistema capaz de realizar processamento paralelo, o *software* projetado para implementar o esquema de controle MPC foi desenvolvido para utilizar somente um único processador.

### 5.3.1 Simulação 6: Modelo Não-linear – Tempo Real

Nessa seção serão apresentados os resultados referentes a duas simulações em tempo real da estratégia de controle MPC baseado em modelo não-linear, empregando dois tamanhos distintos para o horizonte de predição, a saber:  $N_1 = 5$  e  $N_2 = 3$ . Assim, o objetivo de se considerar diferentes tamanhos para o horizonte de predição é encontrar uma configuração tal que a execução do algoritmo de controle seja rápida o bastante para ser realizada em um tempo menor que o período de amostragem considerado no trabalho.

#### 5.3.1.1 Horizonte de Predição $N_1 = 5$

Nesta primeira simulação considera-se um horizonte de predição  $N_1 = 5$ , igual ao utilizado na simulação apresentada na seção 5.2.1. Os parâmetros do controlador para a simulação do MPC em tempo real empregando o modelo não-linear são definidos na equação (84). Utilizou-se como variáveis de decisão no problema de otimização as coordenadas cartesianas da extremidade do robô bracejador e as entradas independentes de controle.

$$N = 5, \quad Q = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 \\ 0 & 0,5 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 0,25 & 0 \\ 0 & 0,25 \end{bmatrix} \quad (84)$$

As Figuras 49 a 52 apresentam os resultados obtidos nessa simulação. A trajetória realizada pelo robô, no plano cartesiano pode ser visualizada na Figura 49, sendo possível observar que o robô foi capaz de executar o movimento completo de bracejamento na primeira tentativa. Os torques computados pelo controlador para a execução do movimento podem ser visualizados na Figura 50.

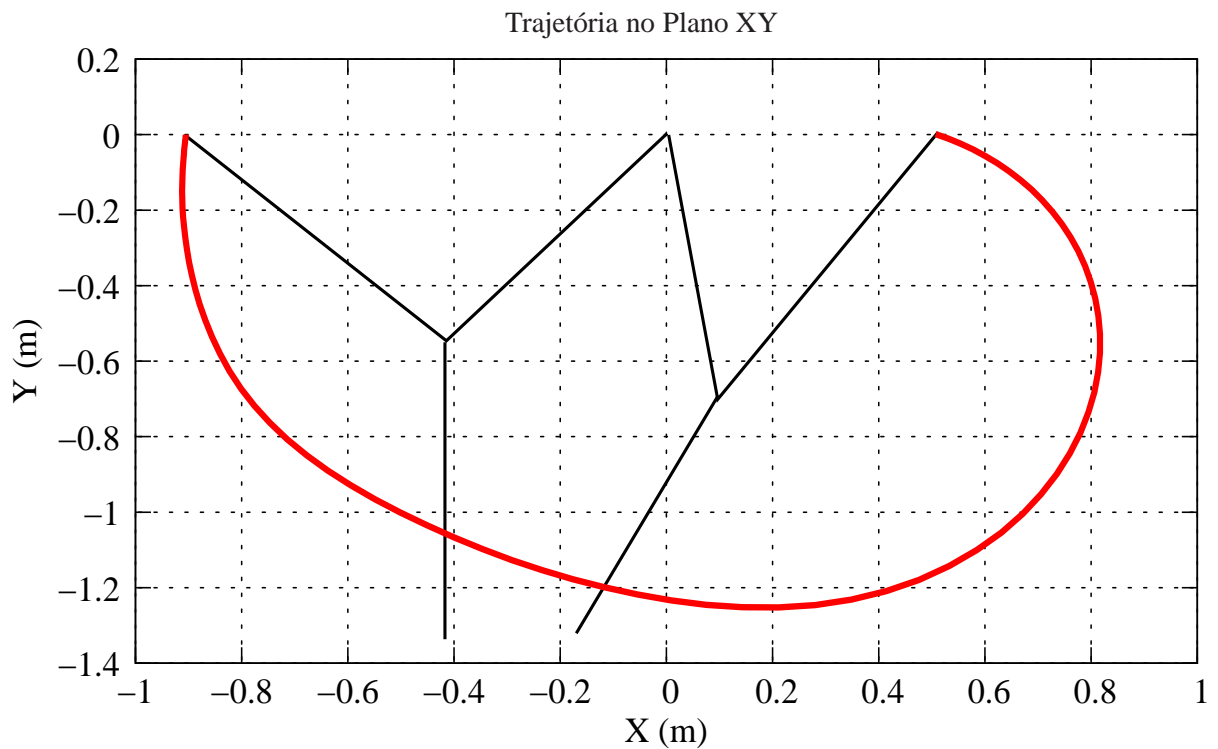


Figura 49: Trajetória cartesiana realizada pelo robô (simulação 6 –  $N_1 = 5$ ).

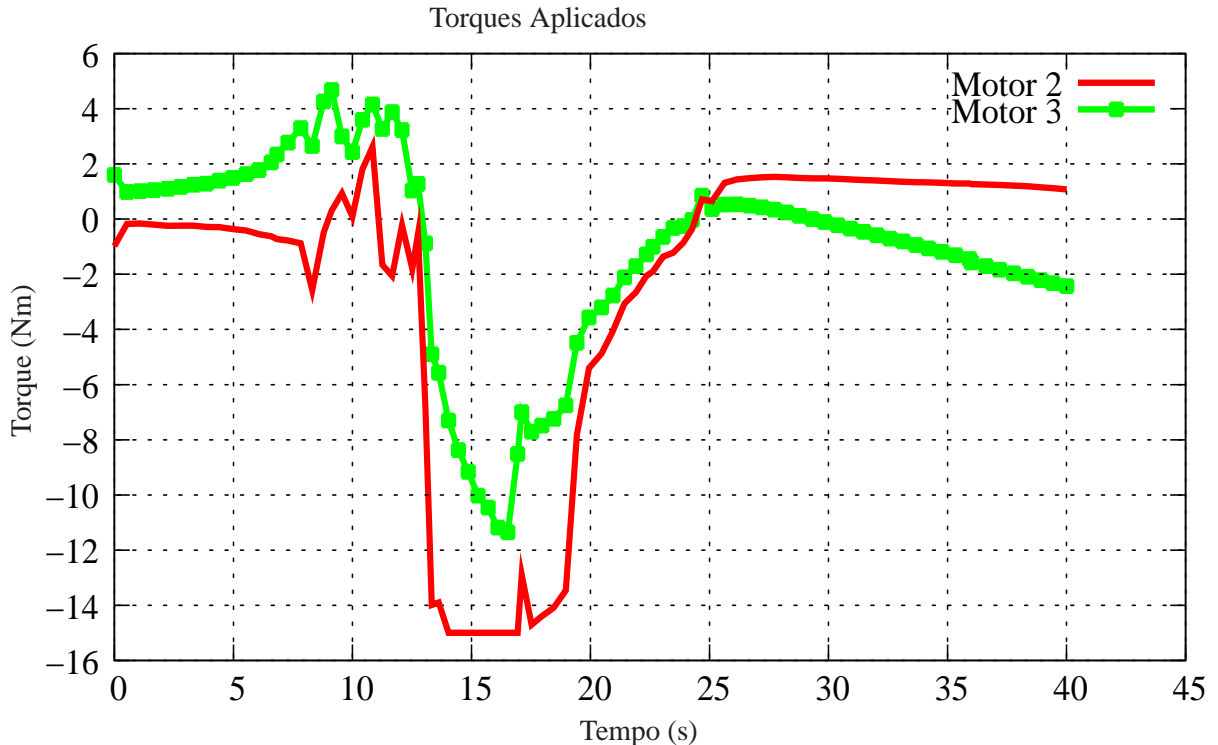


Figura 50: Torque aplicado por cada motor (simulação 6 –  $N_1 = 5$ ).

Nas Figuras 51 e 52 apresentam-se, respectivamente, a trajetória angular de cada junta ao longo do movimento de bracejamento executado pelo robô e o tempo de computação utilizado pela estratégia de controle para calcular os torques necessários. É importante

destacar que o tempo total é gasto, na sua grande parte, pelo algoritmo de otimização não-linear `donlp2` empregado para o cálculo da lei de controle.

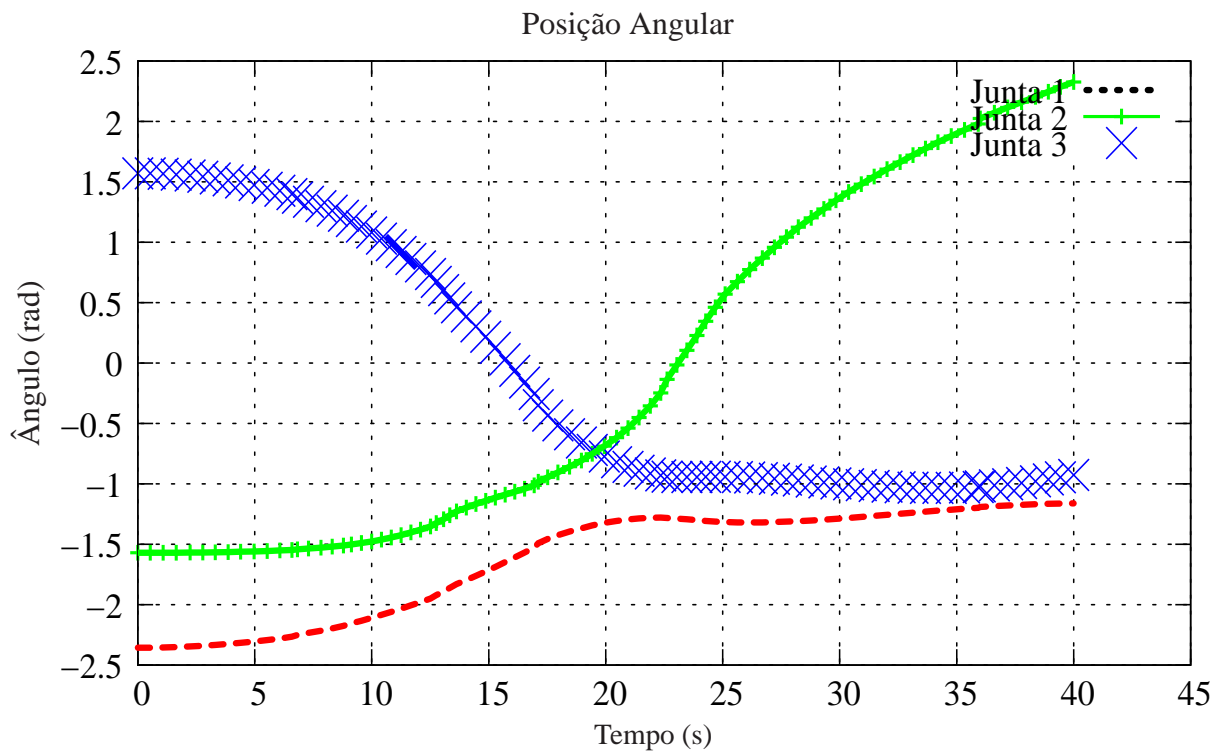


Figura 51: Posição angular de cada junta (simulação 6 –  $N_1 = 5$ ).

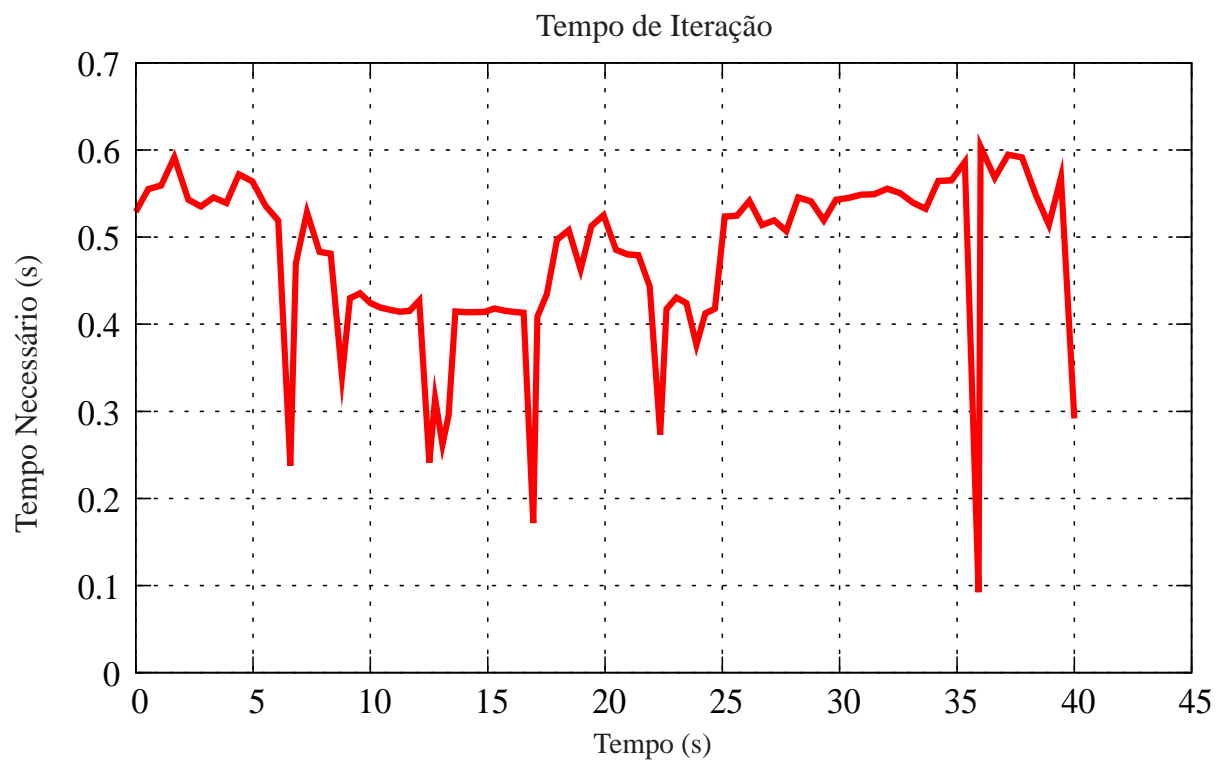


Figura 52: Tempo necessário para cálculo do sinal de controle (simulação 6 –  $N_1 = 5$ ).



### 5.3.1.2 Horizonte de Predição $N_2 = 3$

O objetivo dessa seção é apresentar o mesmo esquema de controle MPC desenvolvido na seção anterior, apenas com a diferença de se utilizar um horizonte de predição menor, na tentativa de, uma vez completado o movimento de bracejamento, computar o valor do sinal de controle em um tempo também menor, na expectativa de se obter a solução do problema em um tempo curto o suficiente para que seja possível executar o cálculo dentro do período de amostragem  $T = 10 \text{ ms}$ .

Os parâmetros do controlador para a simulação do MPC em tempo real empregando o modelo não-linear são definidos na equação 85.

$$N = 3, \quad Q = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 \\ 0 & 0,5 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 0,25 & 0 \\ 0 & 0,25 \end{bmatrix} \quad (85)$$

As Figuras 53 a 56 apresentam os resultados da simulação utilizando o horizonte de predição  $N_2 = 3$ . A trajetória realizada pelo robô, no plano cartesiano, pode ser visualizada na Figura 53.

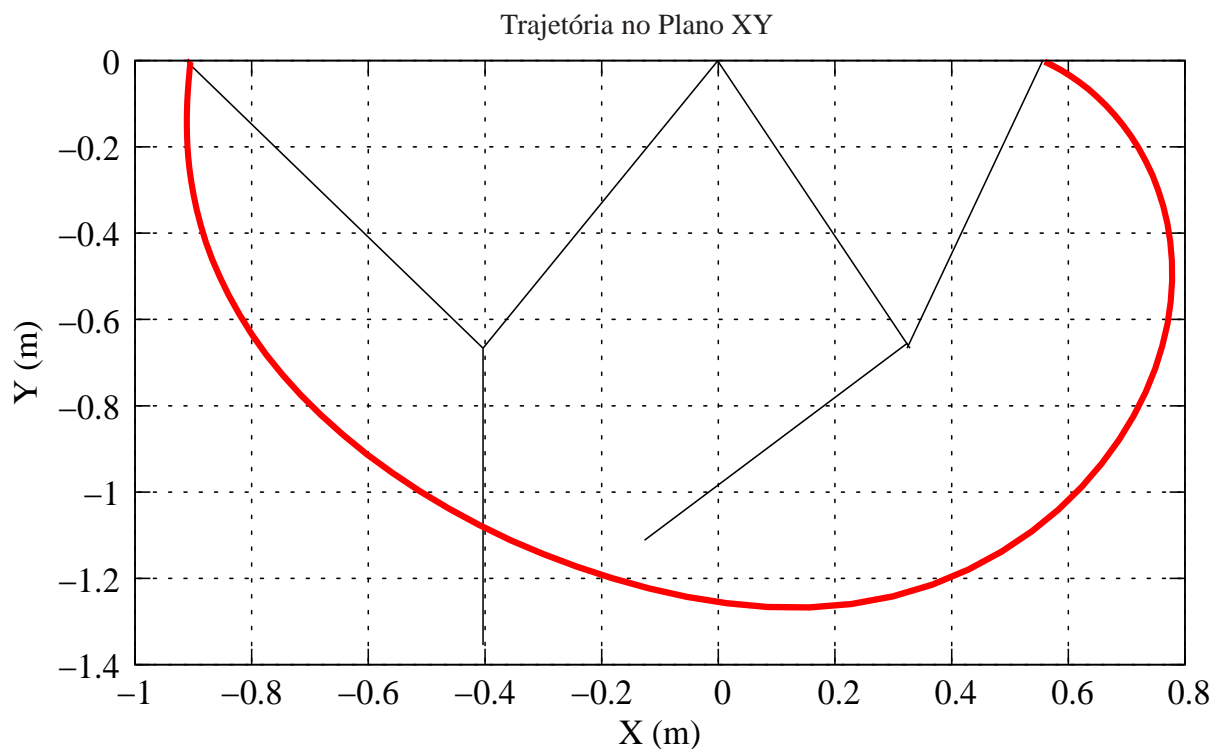


Figura 53: Trajetória cartesiana realizada pelo robô (simulação 6 –  $N_2 = 3$ ).

O torque desenvolvido pelos motores para mover o robô são mostrados na Figura 54 e os valores das coordenadas de junta ao longo do movimento podem ser vistos na Figura 55.

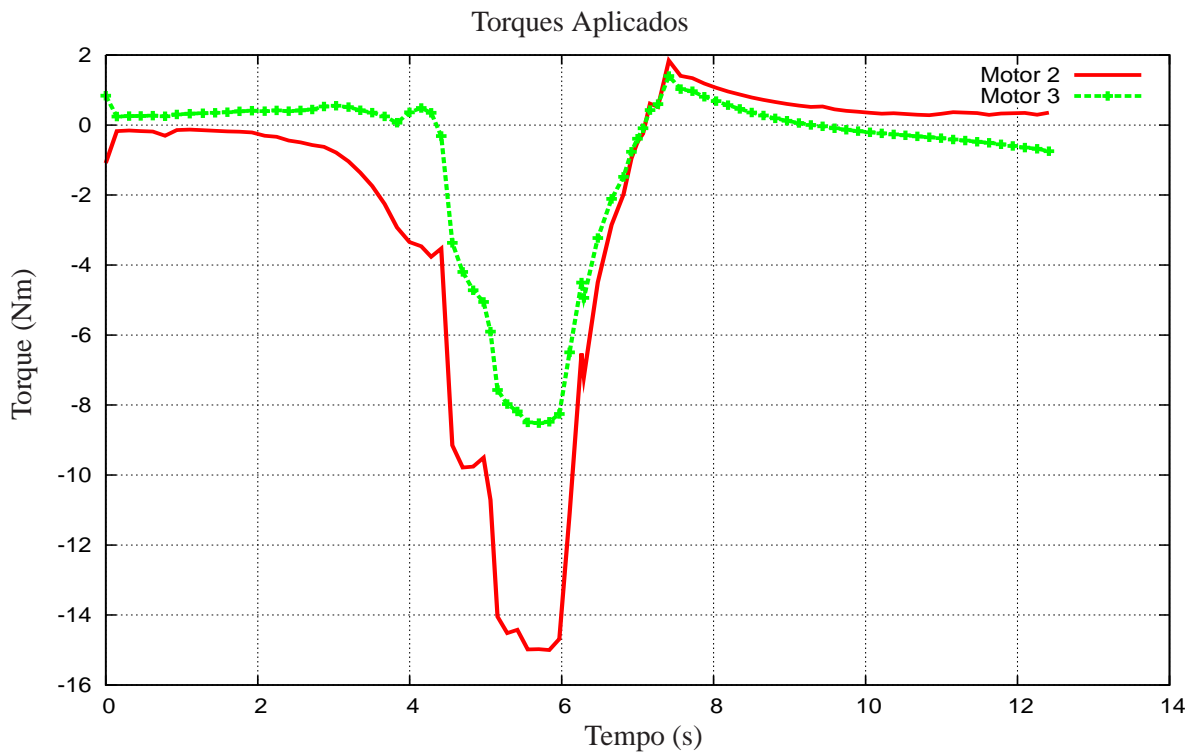


Figura 54: Torque aplicado por cada motor (simulação 6 –  $N_2 = 3$ ).

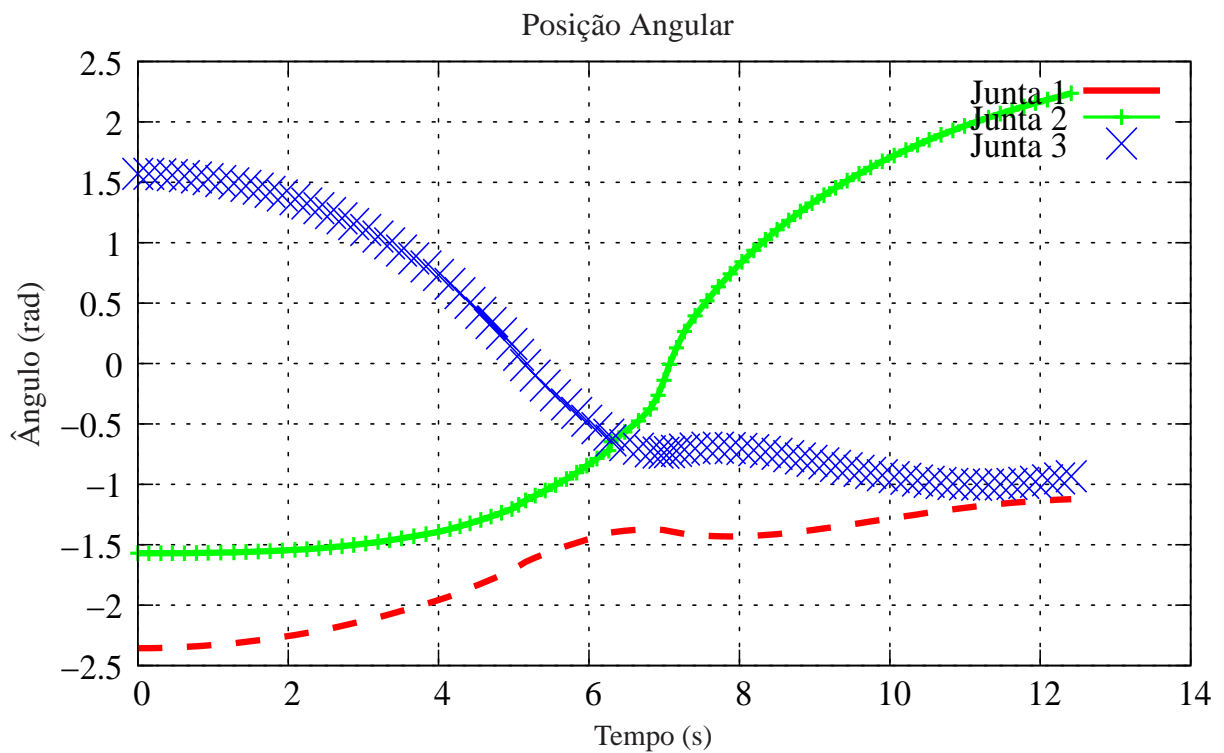


Figura 55: Posição angular de cada junta (simulação 6 –  $N_2 = 3$ ).

Na Figura 56 pode-se observar o tempo requerido pelo controlador para o cálculo dos sinais de controle.

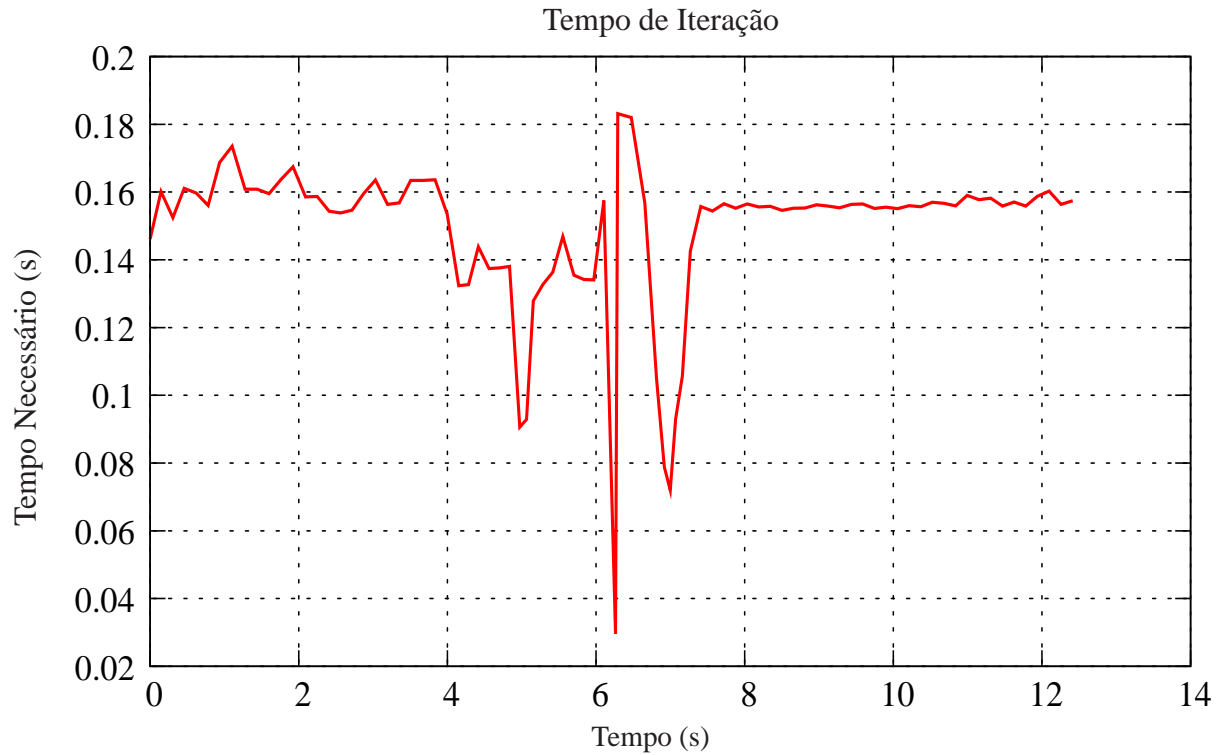


Figura 56: Tempo necessário para cálculo do sinal de controle (simulação 6 –  $N_2 = 3$ ).

Como era de se esperar, a partir da observação das Figuras 52 e 56, que é muito menor o tempo requerido para se calcular a lei de controle com horizonte de predição  $N_2 = 3$  em relação ao tempo gasto para executar a simulação com horizonte de predição  $N_1 = 5$ . Entretanto, o tempo necessário para a execução do algoritmo de controle, em ambos os casos, é maior que o período de amostragem utilizado ( $10ms$ ).

Desse modo, não é possível utilizar até o momento, o controlador proposto baseado em modelo não-linear considerando aspectos de tempo real. Acredita-se que seja possível melhorar o desempenho com o uso de programação paralela para o algoritmo de otimização e, também, alterar a configuração dos parâmetros envolvidos no algoritmo de otimização utilizado para a solução do problema.

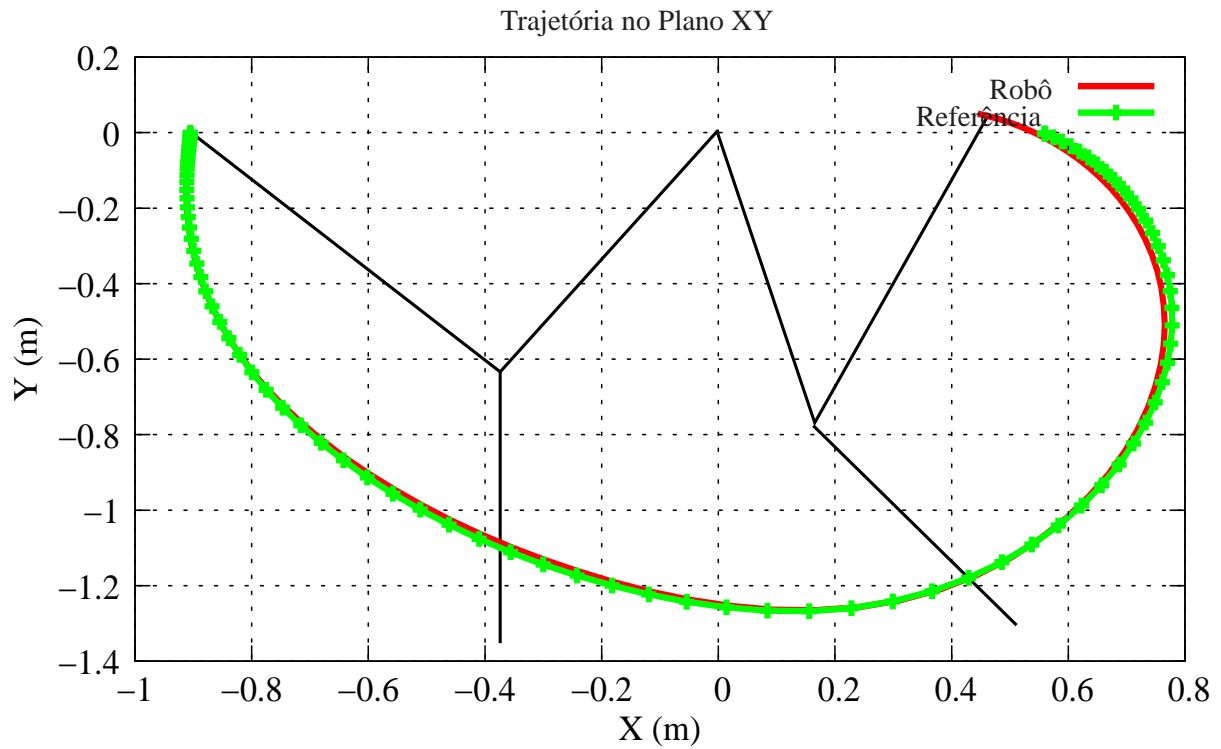


Figura 57: Trajetória executada pelo robô – simulação 7.

### 5.3.2 Simulação 7: Modelo Linearizado – Tempo Real

Nesta seção serão mostrados os resultados do controlador MPC, considerando-se apenas um único horizonte de predição, com os parâmetros definidos a seguir:

$$N = 5, \quad Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (86)$$

A Figura 57 apresenta a posição cartesiana do robô ao longo do movimento e a trajetória de referência utilizada. O torque de referência e o torque aplicado ao robô, respectivamente,  $\tau$  nas juntas 1 e 2 podem ser visualizados nas Figuras 58 e 59. As variáveis de posição angular são apresentadas nas Figuras 60, 61 e 62. O tempo requerido para o cálculo do sinal de controle é apresentado na Figura 52.

Observa-se, ao final dessa simulação, que o tempo necessário para a obtenção do sinal de controle utilizando a estratégia de controle MPC com modelo linearizado durante o horizonte de predição foi bastante menor do que o tempo gasto para a realização do cálculo do sinal de controle considerando-se o MPC com o modelo não-linear.

Assim, o tempo requerido para este caso é menor que o período de amostragem definido ( $T = 10 \text{ ms}$ ), o que torna possível a utilização desse esquema de controle MPC com modelo linearizado em uma aplicação prática para controle de robôs braçadores.

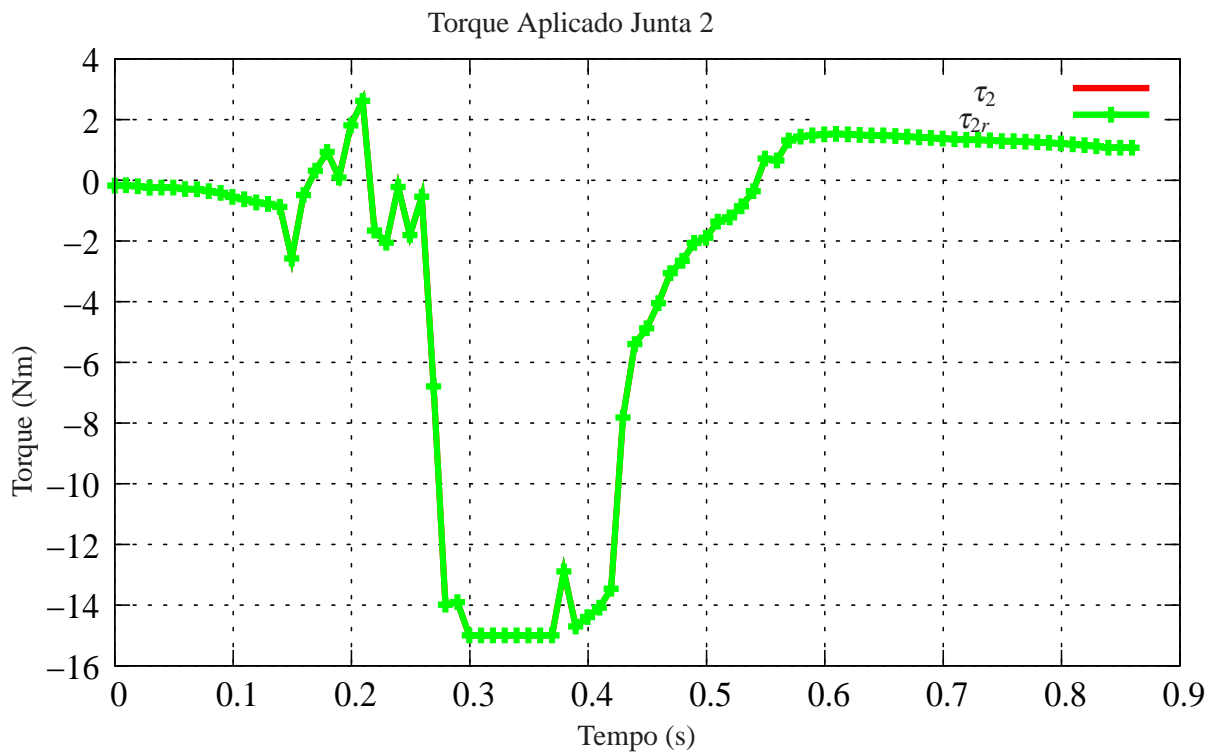


Figura 58: Torque aplicado na junta 2 (simulação 7).

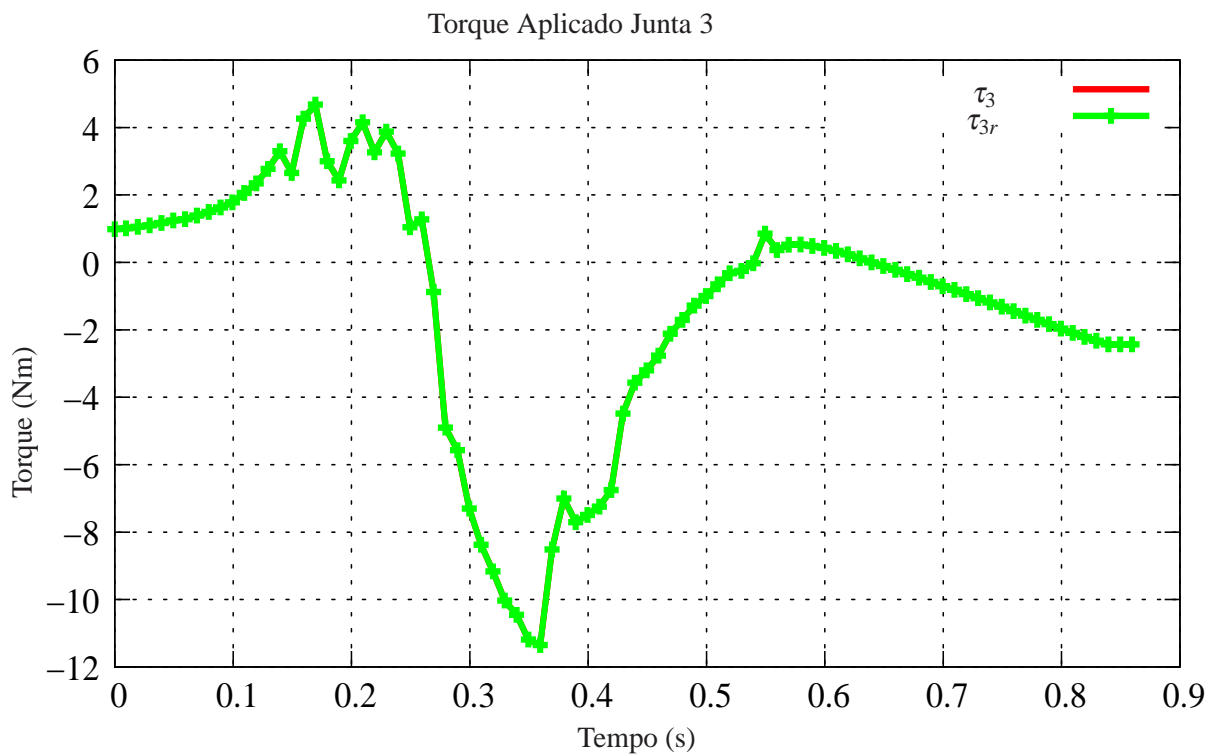


Figura 59: Torque aplicado na junta 3 (simulação 7).

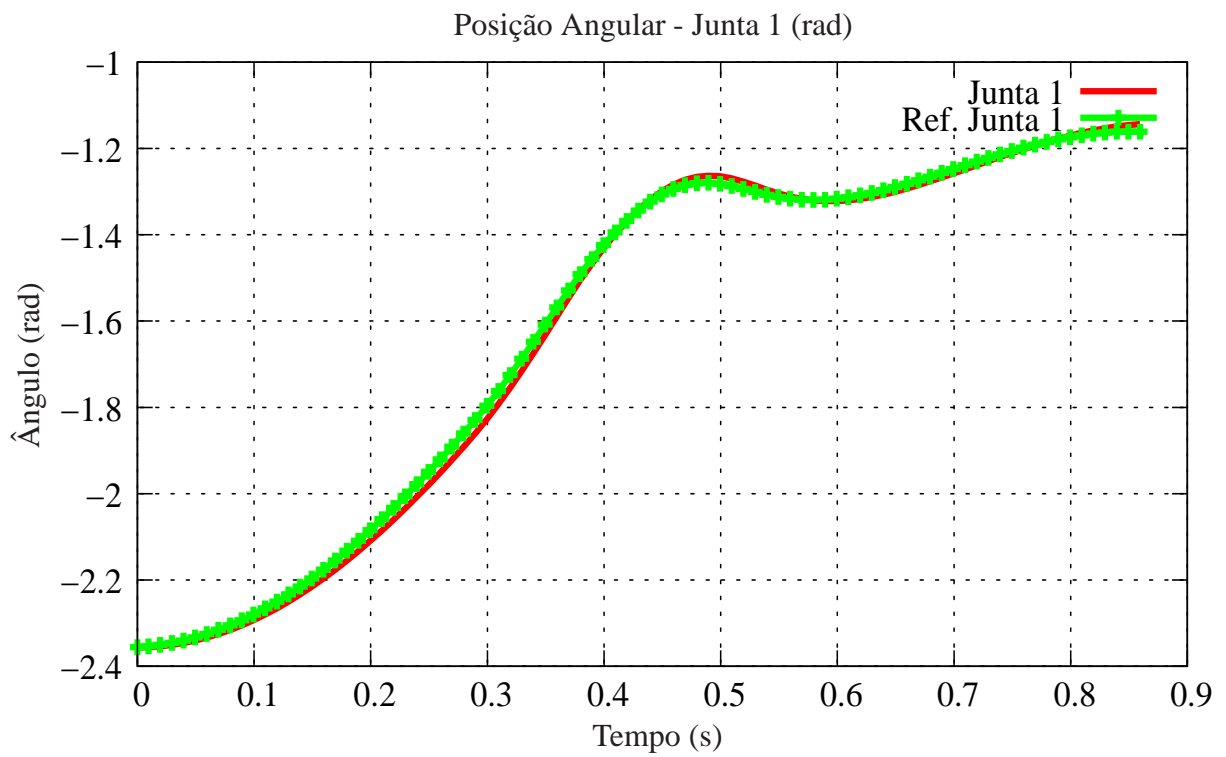


Figura 60: Posição angular da junta 1 (simulação 7).

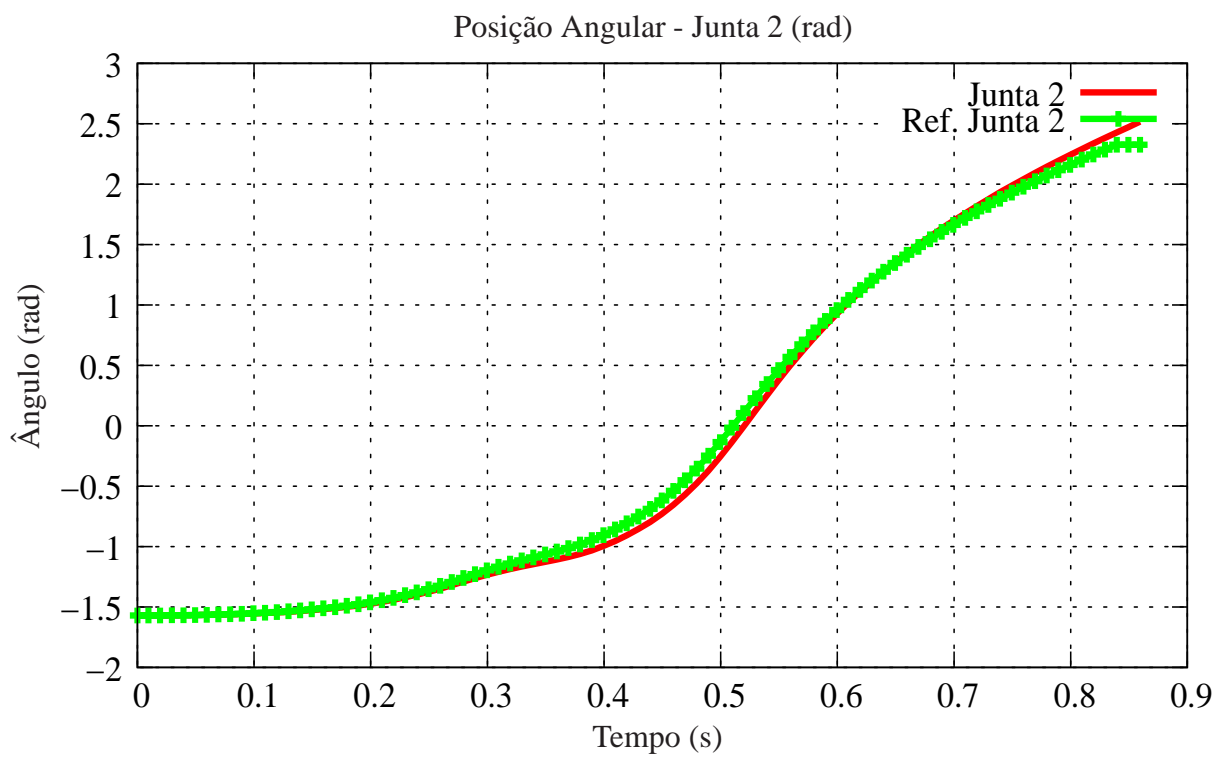


Figura 61: Posição angular da junta 2 (simulação 7).

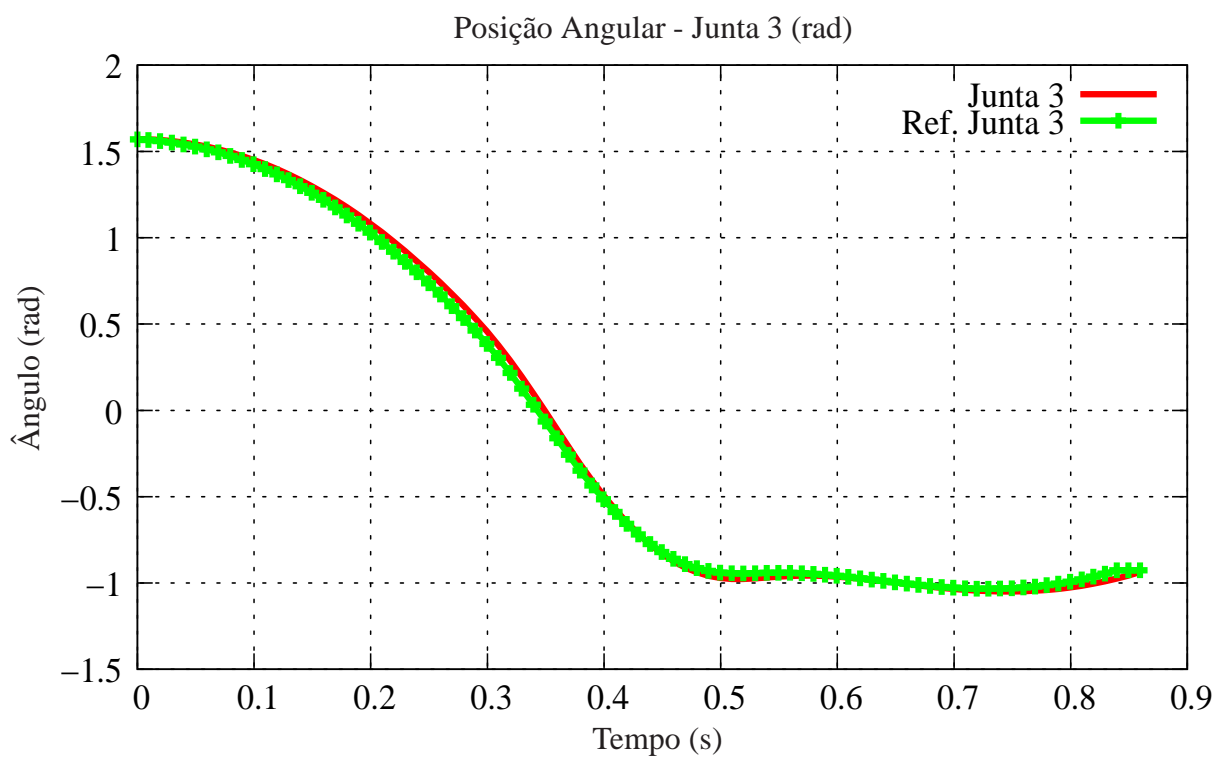


Figura 62: Posição angular da junta 3 (simulação 7).

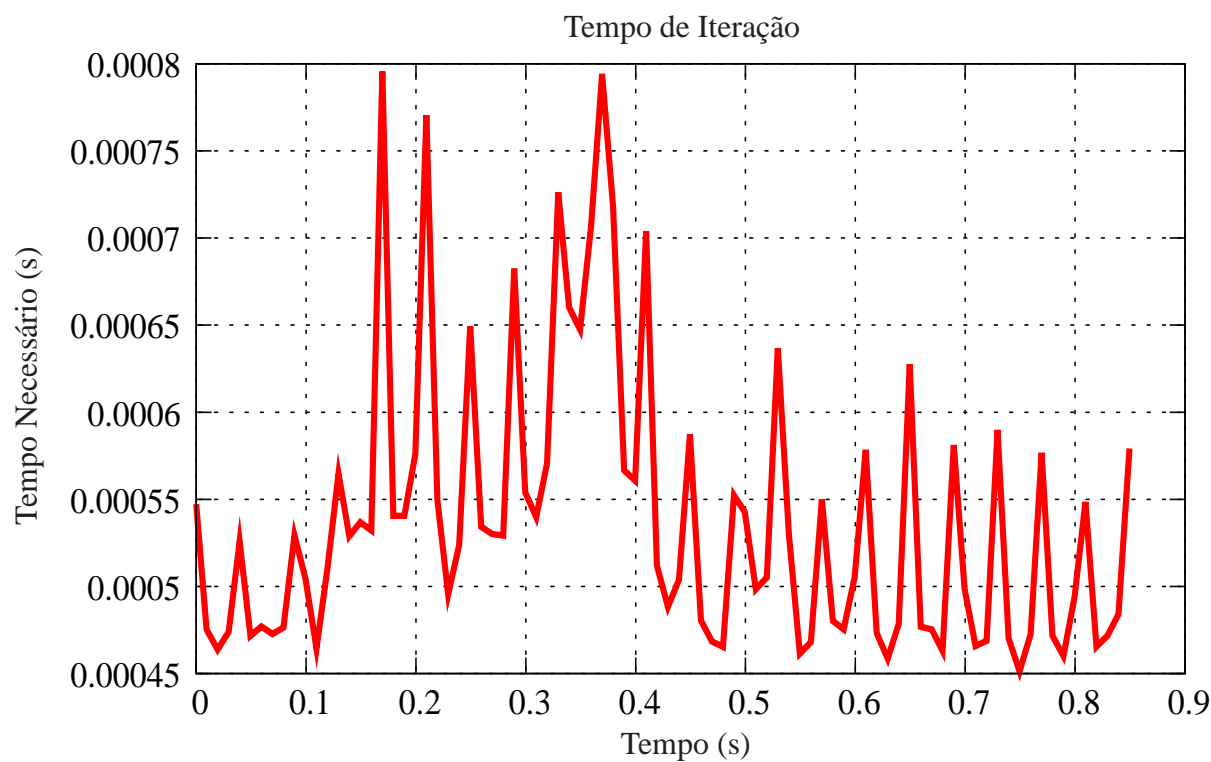


Figura 63: Tempo necessário de computação – simulação 7.





## 6 CONCLUSÃO

Ao longo das últimas décadas tem sido grande o interesse da comunidade científica no estudo de sistemas mecânicos subatuados, tanto pela diversidade de aplicações, como por exemplo, falha de algum atuador em sistemas totalmente atuados, decisão de projeto (redução do peso total do robô) ou mesmo pela característica intrínseca da aplicação desejada (caso de robôs flexíveis e *VTOL*) quanto pelo desafio que se apresenta o desenvolvimento de estratégias de controle de tais sistemas, uma vez que ainda hoje não há, até onde se pôde conhecer, uma teoria geral para o controle de sistemas subatuados. Muito embora existam diferentes estratégias de controle, tais técnicas fazem uso de características particulares de cada aplicação.

O trabalho ora apresentado tem por objetivo a caracterização dinâmica de um robô bracejador e o desenvolvimento de uma estratégia de controle em malha fechada que, além de ser capaz de tratar de modo direto a propriedade de subatuação desse sistema e as restrições não-holônicas a que está submetido, conduza o robô para a realização do movimento completo de bracejamento.

Inicialmente foram desenvolvidos os modelos matemáticos para a cinemática direta e para a dinâmica do robô proposto. Para o caso da cinemática direta, utilizou-se uma extensão da convenção de *Denavit-Hartenberg*, a qual considera somente uma seqüência de elos. Para esse trabalho foi necessária uma simples alteração na determinação dos sistemas de coordenadas de referência, para que seja possível considerar situações em que mais de um elo são ligados ao elo anterior (tipo bifurcação, no caso de dois elos). Para a obtenção do modelo dinâmico foi utilizada a metodologia de Euler-Lagrange, a qual se baseia na energia do sistema (OLIVEIRA; LAGES, 2006c,d).

Na seqüência, uma vez desenvolvido o modelo matemático para a dinâmica do robô bracejador, partiu-se, então, para a análise desse sistema, já que, devido ao fato de ser um sistema subatuado, apresenta restrição diferencial de segunda ordem (também chamada de restrição de aceleração). Após, as restrições dinâmicas existentes foram analisadas e, com base no Teorema de Frobenius, foram classificadas como restrições diferenciais de segunda ordem não-holonômicas, o que torna o trabalho bastante desafiador do ponto de vista da teoria de controle.

Várias são as abordagens encontradas na literatura para o controle de sistemas mecânicos subatuados e, de modo particular a esse trabalho, para robôs bracejadores. Na sua grande maioria, para o controle efetivo desses sistemas é feita a combinação de diferentes estratégias de controle, a fim de se conseguir que o robô execute o movimento de bracejamento de forma completa. Sendo assim, depois de se estudar várias estratégias de controle para a aplicação desejada, destaca-se, de maneira particular, a estratégia de controle preditivo baseado em modelo como uma estratégia de controle que apresenta importantes características desejadas para o controle de robôs bracejadores.

Na tentativa de estabelecer um esquema de controle em malha fechada para ser utilizado para controlar o robô bracejador apresentado no capítulo 1, optou-se por empregar o controlador preditivo baseado em modelo com horizonte de predição deslizante, o qual apresenta várias vantagens que são importantes para tratar a questão de subatuação do sistema em análise.

Apresentam-se como principais vantagens dessa abordagem de controle a possibilidade de se obter uma lei de controle a partir da otimização de algum critério definido por meio da função objetivo e a possibilidade de tratar de maneira direta restrições no estado e nas entradas independentes de controle. Tal característica permite que a lei de controle calculada seja aplicada ao sistema de modo que o movimento realizado pelo robô respeite os limites físicos definidos, como limite de torque dos motores e amplitude máxima de cada uma das juntas (pode se definir, também, valores limites para a velocidade angular de cada junta).

Entretanto, tem-se como principal desvantagem dessa estratégia de controle o excessivo tempo de processamento necessário para a solução do problema de otimização a cada vez que se deseja obter uma nova entrada para o sistema, o que poderia tornar inviável o uso dessa estratégia, em situação prática, para o controle do robô bracejador.

Assim, com esse objetivo, diferentes simulações foram realizadas na tentativa de validar a aplicação do controlador preditivo para o controle do robô bracejador, para a execução do movimento de bracejamento (tanto bracejamento único quanto bracejamento contínuo) ao longo de uma linha horizontal. Para tal, foram consideradas duas versões para esse controlador, uma baseada em modelo não-linear da dinâmica para ser utilizado no horizonte de predição e outra considerando uma versão linearizada da dinâmica (OLIVEIRA; LAGES, 2006a,e).

Numa primeira implementação foram realizadas simulações considerando MPC com modelo não-linear de predição, tendo como tarefa a realização tanto de bracejamento único quanto de bracejamento contínuo. Pôde-se verificar, por meio dos gráficos apresentados, que as restrições impostas ao problema de otimização foram todas satisfeitas. Também simulou-se o MPC utilizando-se um modelo linearizado da dinâmica para o horizonte de predição e, novamente, os resultados obtidos foram plenamente satisfatórios, sendo as restrições impostas igualmente respeitadas. Nesse caso, a tarefa consistia em seguir uma dada trajetória de referência, em torno da qual realiza-se a linearização do modelo.

É importante salientar o caso simulado de o robô não conseguir realizar o bracejamento logo após se soltar da posição inicial. Ao não conseguir segurar na linha horizontal numa posição à frente, o controlador calcula a seqüência de controle para que o robô realize o movimento de balanço para adquirir energia suficiente para, num segundo momento, conseguir alcançar a linha horizontal, de forma a completar o movimento de bracejamento. Aqui salienta-se o fato de que nenhuma informação adicional foi dada ao controlador, sendo ele responsável em determinar o sinal de controle capaz de levar o robô a realizar a tarefa inicialmente proposta.

Outro resultado bastante interessante obtido foi a possibilidade de realização de bracejamento tanto por *under-swing* quanto por *over hand*, sendo necessário somente alterar as variações angulares de cada junta, e o controlador foi capaz de interpretar tais restrições e gerar um outro tipo de bracejamento. Tal capacidade não é possível encontrar em nenhuma das variadas estratégias empregadas no controle de robôs bracejadores.

Fica evidente, depois de se observar as diferentes simulações apresentadas no capítulo 3, que o trabalho ora proposto, baseado na estratégia de controle MPC aplicada

a robôs bracejadores, apresenta resultados de simulação muito promissores. Embora a grande desvantagem dessa estratégia seja o alto custo computacional para a obtenção do sinal de controle devido à solução do problema de otimização no qual baseia, tem-se resultados que comprovam a viabilidade de aplicação dessa proposição. Os tempos medidos para o cálculo do controle, considerando-se a versão do MPC com modelo linearizado para a predição, mostram-se menores que o período de amostragem do sistema, ou seja, é possível resolver o problema de otimização (para esse caso otimização linear) e, conseqüentemente, calcular a lei de controle dentro do tempo de amostragem definido. Para o caso do MPC baseado em modelo não-linear para a predição, os tempos obtidos mostram que não seria possível a sua utilização na prática, pois os tempos de computação foram maiores que o período de amostragem utilizado (na ordem de 10 a 15 vezes maiores).

De modo geral, pode-se dizer que a estratégia de controle empregada neste trabalho é capaz de fazer com que o robô realize, com sucesso, o movimento de bracejamento (bracejamento único ou contínuo), de tal modo que as restrições impostas ao sistema não sejam violadas.

## 6.1 Perspectivas Futuras

Durante a realização deste trabalho, várias respostas foram apresentadas ao problema inicialmente proposto, qual seja, o controle em malha fechada de um robô bracejador. Ao mesmo tempo, vários questionamentos também foram suscitados, de tal modo que o assunto não poderia, mesmo que desejado, ser completamente tratado neste trabalho. Assim, vários são os temas que necessitam ser melhor e mais profundamente investigados, visto que se apresentam como temas em aberto, sem uma teorização definitiva.

Uma interessante questão que se apresenta é quando se torna mais vantajoso realizar o movimento de bracejamento tipo *under-swing* ou bracejamento tipo *over-hand*. A partir da posição inicial e das restrições do sistema, seria interessante saber, a priori, qual seria o tipo de bracejamento a ser executado pelo robô.

Ainda com relação ao tipo de bracejamento que o robô pode executar, não se abordou neste trabalho o caso de bracejamento tipo ricocheteamento, no qual o robô adquire velocidade suficiente para, em vôo livre, alcançar a linha horizontal em uma distância além da sua envergadura (comprimento total dos dois braços).

Outra possibilidade de movimento que se apresenta é a realização de movimento contínuo junto à linha horizontal, sem que seja necessário soltar umas das *mãos* do robô. Acredita-se que seja possível a execução desse movimento utilizando o mesmo esquema de controle apresentado neste trabalho, sendo necessário, entretanto, ajustar de maneira adequada as restrições impostas ao controlador MPC.

Como fora afirmado anteriormente, o controlador MPC utilizando modelo não-linear apresenta tempos de processamento que não permitem a sua aplicação prática para o controle de robôs bracejadores, de acordo com os resultados expostos. Entretanto, pode-se investigar uma melhor sintonia dos parâmetros do algoritmo de otimização empregado, na tentativa de se reduzir o tempo necessário para o cômputo da lei de controle e paralelização da solução implementada, aproveitando os processadores *multi-core* disponíveis hoje em dia.

Uma pequena alteração na estratégia de controle proposta neste trabalho, a inclusão de uma malha interna de controle que realiza a linearização parcial do sistema, pode ser uma opção viável para a redução do tempo necessário à solução do problema de otimização. O problema ainda será de otimização não-convexa, entretanto, de dimensão menor. Deve-se

investigar, também, que tipo de linearização parcial é mais adequada, se a linearização parcial colocada ou a linearização parcial não-colocada.

Do ponto de vista do estudo de robôs subatuados, existem duas classes diferentes de robôs, as quais apresentam diferentes configurações de atuação. A diferença entre as configurações está na relação entre o número de graus de liberdade ativos (atuados diretamente) e o número de graus de liberdade passivos (não atuados diretamente) (OLIVEIRA; LAGES, 2007a,b). Também se deve estabelecer critérios para o cotejamento entre as classes de robôs subatuados propostas, de tal modo a se definir qual classe é mais adequada de se utilizar para uma dada tarefa. Inicialmente pensa-se em empregar alguma metodologia que relacione a energia necessária para executar o movimento e o tempo gasto na solução do problema.

Por fim, todo o trabalho teórico apresentado deverá ser validado em um robô real, o qual se encontra em fase de projeto. A partir dos resultados práticos será possível verificar a utilização da estratégia de controle proposta nesse trabalho.

## REFERÊNCIAS

AGUILAR, L. T.; BOIKO, I.; FRIDMAN, L.; IRIARTE, R. Generation of Periodic Motions for Underactuated Mechanical Systems via Second-Order Sliding Modes. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 2006, Minneapolis, USA. **Proceedings...**Minneapolis: ACC, 2006. p.5396–5400.

ALBU-SCHÄFFER, A.; OTT, C.; HIRZINGER, G. Constructive Energy Shaping Based Impedance Control for a Class of Underactuated Euler-Lagrange Systems. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2005, Barcelona, Spain. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2005. p.1387–1393.

ANEKE, N. P. I. **Control of Underactuated Mechanical Systems**. 2003. Thesis — Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, The Netherlands.

ARACIL, R. et al. Telerobotic system for live-power line maintenance. **Control Engineering Practice**, Oxford UK, v.10, n.11, p.1271–1281, Nov. 2002.

ARAI, H.; TANIE, K.; SHIROMA, N. Nonholonomic Control of a Three-DOF Planar Underactuated Manipulator. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, Piscataway, USA, v.14, n.5, p.681–695, Oct. 1998.

ARAKI, N.; OKADA, M.; KONISHI, Y. Parameter Identification and Swing-Up Control of an Acrobot System. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY – ICIT, 2005, Hong Kong, China. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2005. p.1040–1045.

AZEVEDO, C.; POIGNET, P.; ESPIAU, B. Artificial Locomotion Control: from human to robots. **Robotics and Autonomous Systems**, Amsterdam, The Netherlands, v.47, n.4, p.203–223, June 2004.

BANAVAR, R. N.; MAHINDRAKAR, A. D. Energy-Based Swing-Up of the Acrobot and Time-Optimal Motion. In: IEEE CONFERENCE ON CONTROL APPLICATIONS, 2003, Istanbul, Turkey. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2003. v.1, p.706–711.

BERTRAM, J. E. A. New Perspectives on Brachiation Mechanics. **Yearbook of Physical Anthropology**, Washington, USA, v.125, n.S39, p.100–117, 2005.

BROCKETT, R. W. Control Theory and Singular Riemannian Geometry. In: HILTON, P. J.; YOUNG, G. S. (Ed.). **New Directions in Applied Mathematics**. New York, USA: Springer-Verlag, 1981. p.11–27.

CAMACHO, E. F.; BORDONS, C. **Model Predictive Control**. 2.ed. London, England: Springer-Verlag, 1999. (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing).

CAMPION, G.; BASTIN, G.; D'ANDRÉA-NOVEL, B. Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, Piscataway, USA, v.12, n.1, p.47–62, Feb. 1996.

CAMPO, P. J.; MORARI, M. Robust Model Predictive Control. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 1987, Minneapolis, USA. **Proceedings...**Minneapolis: ACC, 1987. p.1021–1026.

CAMPOS, M. F. M. et al. A Robot for Installation and Removal of Aircraft Warning Spheres on Aerial Power Transmission Lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, USA, v.18, n.4, p.1581–1582, Oct. 2003.

CHEN, C.; SHAW, L. On Receding Horizon Feedback Control. **Automatica**, Oxford, UK, v.18, n.3, p.349–352, 1982.

CLARKE, D. W.; MOHTADI, C.; STUFFS, P. S. Generalized Predictive Control – I. the basic algorithm. **Automatica**, Oxford, UK, v.23, p.137–148, 1987.

CÔTÉ, J.; MONTAMBAULT, S.; ST-LOIUS, M. Preliminary Results on the Development of a Teleoperated Compact Trolley for Live-Line Maintenance. In: IEEE CONFERENCE ON TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONSTRUCTION, OPERATION AND LIVE-LINE MAINTENANCE, 2000, Montreal, Canada. **Proceedings...**New York: IEEE Press, 2000. p.21–27.

DEJONG, G.; SPONG, M. W. Swinging Up the Acrobot: an example of intelligent control. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 1994, Baltimore, USA. **Proceedings...**Baltimore: ACC, 1994. p.2158–2162.

DOI, M.; HASEGAWA, Y.; FUKUDA, T. Passive Dynamic Autonomous Control of Bipedal Walking. In: IEEE-RAS/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANOID ROBOTS, 2004, Los Angeles, USA. **Proceedings...**New York: IEEE Press, 2004. n.Paper #72.

EIMERL, S.; DEVORE, I. **The Primates**. New York, USA: Time-Life Books, 1966.

EL-FARRA, N. H.; MHASKAR, P.; CHRISTOFIDES, P. D. Hybrid Control: a paradigm for implementing predictive control to nonlinear systems with guaranteed stability regions. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 2003, Denver, USA. **Proceedings...**Denver: ACC, 2003. p.4899–4907.

ESSEN, H. V.; NIJMEIJER, H. Non-Linear Model Predictive Control of Constrained Mobile Robots. In: EUROPEAN CONTROL CONFERENCE, 2001, Porto, Portugal. **Proceedings...**Porto: FEUP, 2001. p.1157–1162.

FANTONI, I.; LOZANO, R. **Non-linear Control for Underactuated Mechanical Systems**. London, England: Springer-Verlag, 2002. (Communications and Control Engineering).

FAUCHER, D.; LESSARD, J.; CÔTÉ, P. R. J.; MCGEE, J.-Y. Ground operated teleoperation system for live power line maintenance. In: IEEE CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS, 1996, Beijing, China. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1996. v.1, p.792–798.

FU, K. S.; GONZALES, R. C.; LEE, C. S. G. **Robotics: control, sensing, vision and intelligence**. USA: McGraw-Hill, 1987. (CAD/CAM Robotics and Computer).

FUKUDA, T.; HOSOKAL, H.; KONDO, Y. Brachiation Type of Mobile Robot. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED ROBOTICS, 1991, Pisa, Italy. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1991. p.915–920. (Robots in Unstructured Environments, v.2).

FUKUDA, T.; KOJIMA, S.; SEKIYAMA, K.; HASEGAWA, Y. Design Method of Brachiation Controller based on Virtual Holonomic Constraint. In: IEEE/ASME INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INTELLIGENT MECHATRONICS, 2007, Zürich, Switzerland. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2007.

FUKUDA, T.; SAITO, F.; ARAI, F. A Study on the Brachiation Type of Mobile Robots (Heuristic Creation of Driving Input and Control Using CMAC). In: IEEE/RSJ INTERNATIONAL WORKSHOP ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 1991, Osaka, Japan. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1991. v.2, p.478–483.

GARCÍA, C. E.; PRETT, D. M.; MORARI, M. Model Predictive Control: theory and practice - a survey. **Automatica**, Oxford, UK, v.25, n.3, p.335–348, May 1989.

GERTZ, E. M.; WRIGHT, S. **OOQP User Guide**. Madison, USA: University of Wisconsin-Madison, 2004.

GU, D.; HU, H. A Stabilizing Receding Horizon Regulator for Nonholonomic Mobile Robots. **IEEE Transactions on Robotics**, Piscataway, USA, v.21, n.5, p.1022–1028, Oct. 2005.

HASEGAWA, Y.; FUKUDA, T. Learning Method for Hierarchical Behavior Controller. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 1999, Detroit, USA. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1999. p.2799–2804.

HASEGAWA, Y.; FUKUDA, T. Mechanism and Control of Mechatronic System with Higher Degrees of Freedom. **Annual Reviews in Control**, Oxford, UK, n.28, p.137–155, 2004.

HASEGAWA, Y.; FUKUDA, T.; ITO, Y. Behavior Modification for Continuous Locomotion of Brachiating-Type Mobile Robot. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS, 2000, Nashville, USA. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2000. v.5, p.3294–3299.

HASEGAWA, Y.; FUKUDA, T.; SHIMOJIMA, K. Self-Scaling Reinforcement Learning for Fuzzy Logic Controller - Applications to Motion Control of Two-Link Brachiation Robot. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Piscataway, USA, v.46, n.6, p.1123–1131, Dec. 1999.

- HASEGAWA, Y.; FUKUDA, T.; SHIMOJIMA, K.; SAITO, F. Self-Scaling Reinforcement Learning for Fuzzy Logic Controller. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 1996, Nagoya University, Japan. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1996. p.247–252.
- HAUSER, J.; SASTRY, S.; MEYER, G. Nonlinear Control Design for Slightly Non-minimum Phase Systems: application to v/stol aircraft. **Automatica**, Oxford, UK, 1992.
- HENMI, T.; DENG, M.; INOUE, A. Swing-Up Control of the Acrobot Using a New Partial Linearization Controller Based on the Lyapunov Theorem. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NETWORKING, SENSING AND CONTROL – ICNSC, 2006, Ft. Lauderdale, USA. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2006. p.60–65.
- HENMI, T.; WADA, T.; DENG, M.; INOUE, A.; UEKI, N.; HIRASHIMA, U. Swing-Up Control of an Acrobot Having a Limited Range of Joint Angle of Two Links. In: ASIAN CONTROL CONFERENCE, 2004, Melbourne, Australia. **Proceedings...** Melbourne: ASCC, 2004. v.2, p.1071–1076.
- HONG, K.-S. An Open-loop Control for Underactuated Manipulators Using Oscillatory Inputs: steering capability of an unactuated joint. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, Piscataway, USA, v.10, n.3, p.469–480, May 2002.
- ISIDORI, A. **Nonlinear Control Systems**. 2nd.ed. Oxford, UK: Springer-Verlag, 1989.
- JIANG, B.; MAMISHEV, A. Robotic Monitoring of Power Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, USA, v.19, n.3, p.912–918, July 2004.
- JUNG, S.; WEN, J. T. Nonlinear Model Predictive Control for the Swing-Up of a Rotary Inverted Pendulum. **Transaction of the ASME – Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control**, Piscataway, USA, v.126, p.666–673, Sep. 2004.
- KAJIMA, H.; DOI, M.; HASEGAWA, Y.; FUKUDA, T. Study on Brachiation Controller for the Multi-locomotion Robot – Redesigning Behavior Controllers. In: IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 2003, Las Vegas, USA. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2003. p.1388–1393.
- KAJIMA, H.; DOI, M.; HASEGAWA, Y.; FUKUDA, T. Energy Based Swing Control of a Brachiating Robot. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2005, Barcelona, Spain. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2005. p.3681–3686.
- KAJIMA, H.; HASEGAWA, Y.; DOI, M.; FUKUDA, T. Energy-Based Swing-Back Control for Continuous Brachiation of a Multilocomotion Robot. **Proceedings of the International Journal of Intelligent Systems**, USA, v.21, n.9, p.1025–1043, Sep. 2006.
- KIM, M.-S.; OH, S.-K.; SHIN, J.-H.; LEE, J.-J. Robust Model Reference Adaptive Control of Underactuated Robot Manipulators. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2001, Pusan, Korea. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2001. v.3, p.1579–1584.
- KOBAYASHI, T. et al. Swing-Up and Balancing Control of Acrobot. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE SOCIETY OF INSTRUMENT AND CONTROL ENGINEERS, 2002, Osaka, Japan. **Proceedings...** Osaka: SICE, 2002. v.5, p.3072–3075.



KOJIMA, S.; FUKUDA, T.; SEKIYAMA, K.; HASEGAWA, Y. Design Method of Brachiation Controller based on Virtual Holonomic Constraint. In: IEEE/ASME INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INTELLIGENT MECHATRONICS, 2007, Zürich, Switzerland. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2007.

KÜHNE, F. **Controle Preditivo de Roôs Móveis Não-Holonômicos**. 2005. Mestrado em Engenharia Elétrica — Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

LAGES, W. F.; ALVES, J. A. V. Controle de Robôs Móveis em Tempo Real Utilizando Controle Preditivo Baseado em Modelo Linearizado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2006, Salvador, Brasil. **Anais...** SBA, 2006.

LEE, M. A.; SMITH, M. H. Automatic Design and Tuning of a Fuzzy System for Controlling the Acrobot Using Genetic Algorithms, DSFS and Meta-Rule Techniques. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON THE NORTH AMERICAN FUZZY INFORMATION PROCESSING SOCIETY BIENNIAL CONFERENCE, THE INDUSTRIAL FUZZY CONTROL AND INTELLIGENT SYSTEMS CONFERENCE AND NASA JOINT TECHNOLOGY WORKSHOP ON NEURAL NETWORKS AND FUZZY LOGIC, 1994, San Antonio, USA. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1994. p.416–420.

LI, T.; LIJIN, F.; HONGGUANG, W. Development of an Inspection Robot Control System for 500KV Extra-High Voltage Power Transmission Lines. In: ANNUAL CONFERENCE OF SOCIETY OF INSTRUMENT AND CONTROL ENGINEERS, 2004, Sapporo, Japan. **Proceedings...** Sapporo: SICE, 2004. p.1819–1824.

LIANG, Z. ze; LI, E.; TAN, M. Control of Inspection Robots for Power Transmission Lines Based on Remote Video over Internet. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT AGENTS, WEB TECHNOLOGIES AND INTERNET COMMERCE – INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE FOR MODELLING, CONTROL AND AUTOMATION, 2005, Vienna, Austria. **Proceedings...** New York: Computer Society Press, 2005. v.1, p.877–882.

LIMÓN, D.; ÁLAMO, T.; CAMACHO, E. F. Robust MPC Control Based on a Contractive Sequence of Sets. In: CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, 2003, Hawaii, USA. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2003. p.3706–3711.

LIMÓN, D.; ÁLAMO, T.; CAMACHO, E. F. On the Stability of Constrained MPC without Terminal Constraint. **IEEE Transactions on Automatic Control**, Piscataway, USA, v.51, n.5, p.832–836, May 2006.

LUCA, A. de; IANNITTI, S.; MATTONE, R.; ORIOLO, G. Control Problems in Underactuated Manipulators. In: IEEE/ASME INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INTELLIGENT MECHATRONICS, 2001, Como, Italy. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2001. p.855–861.

MAHINDRAKAR, A. D.; BANAVAR, R. N. **Controllability Notions in Nonlinear Systems**. Madras, India: Systems and Control Engineering – Indian Institute of Technology, 2002.

MARUYAMA, Y.; MAKI, K.; MORI, H. A Hot-Line Manipulator Remotely Operated by the Operator in the Ground. **International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance**, Las Vegas, USA, p.437–444, Sep. 1993.

MAYNE, D. Q.; RAWLINGS, J. B.; RAO, C. V.; SCOKAERT, P. O. M. Constrained Model Predictive Control: stability and optimality. **Automatica**, Oxford, UK, v.36, p.789–814, 2000.

MCGEERN, T. Passive Dynamic Walking. **International Journal of Robotics Research**, USA, v.9, n.2, p.62–82, 1990.

MHASKAR, P.; EL-FARRA, N. H.; CHRISTOFIDES, P. D. Predictive Control of Switched Nonlinear Systems with Scheduled Mode Transitions. **IEEE Transactions on Automatic Control**, Piscataway, USA, v.50, n.11, p.1670–1680, Nov. 2005.

MITA, T. K.; FUKUHARA, Y.; MITA, T.; YAMAKITA, M. Swing-Up Control and Avoiding Singular Problem of an Acrobot System. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE SOCIETY OF INSTRUMENT AND CONTROL ENGINEERS, 2002, Tokyo, Japan. **Proceedings...** Tokyo: SICE, 2002. v.5, p.2990–2995.

NAKANISHI, J.; FUKUDA, T. A Leaping Maneuver for a Brachiating Robot. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2000, San Francisco, USA. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2000. p.2822–2827.

NAKANISHI, J.; FUKUDA, T.; KODITSCHKEK, D. E. Preliminary Studies of a Second Generation Brachiation Robot Controller. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 1997, Albuquerque, USA. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1997. p.2050–2056.

NAKANISHI, J.; FUKUDA, T.; KODITSCHKEK, D. E. Experimental Implementation of a "Target Dynamics" Controller on a Two-link Brachiating Robot. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 1998, Leuven, Belgium. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1998. p.787–792.

NAKANISHI, J.; FUKUDA, T.; KODITSCHKEK, D. E. Brachiation on a Ladder With Irregular Intervals. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 1999, Detroit, Michigan. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1999. p.2717–2722.

NAKANISHI, J.; FUKUDA, T.; KODITSCHKEK, D. E. A Hybrid Swing Up Controller for a Two-link Brachiating Robot. In: IEEE/ASME INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INTELLIGENT MECHATRONICS, 1999, Atlanta, USA. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1999. p.549–554.

NAKANISHI, J.; FUKUDA, T.; KODITSCHKEK, D. E. A Brachiating Robot Controller. **Proceedings of the IEEE Transactions on Robotics and Automation**, Piscataway, USA, v.16, n.2, p.109–123, Apr. 2000.

NAKASHIMA, M.; YAKABE, H.; MARUYAMA, Y.; YANO, K.; MORITA, K.; NAKAGAKI, H. Application of Semi-Automatic Robot Technology on Hot-Line Maintenance Work. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 1995, Nagoya, Japan. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1995. v.1, p.843–850.

NISHIMURA, H.; FUNAKI, K. Motion Control of Brachiation Robot by Using Final-State Control for Parameter-Varying Systems. In: CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, 1996, Kobe, Japan. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1996. p.2474–2475.

NISHIMURA, H.; FUNAKI, K. Motion Control of Three-link Brachiation Robot by Using Final-State Control with Error Learning. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, Piscataway, USA, v.3, n.2, p.120–128, June 1998.

NORMEY-RICO, J. E.; GÓMEZ-ORTEGA, J.; CAMACHO, E. F. A Smith-Predictor-Based Generalised Predictive Controller for Mobile Robot Path-Tracking. **Control Engineering Practice**, Oxford, UK, n.7, p.729–740, 1999.

ODAGAKI, H.; MORAN, A.; HAYASE, M. Analysis of the Dynamics and Nonlinear Control of Under-actuated Brachiation Robots. **Proceedings of the Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers - International Session Papers**, Tokushima, Japan, p.1137–1142, July 1997.

OLIVEIRA KOTHARE, S. L. de; MORARI, M. Contractive Model Predictive Control for Constrained Nonlinear Systems. **IEEE Transactions on Automatic Control**, Piscataway, USA, v.45, n.6, p.1053–1071, June 2000.

OLIVEIRA, V. M. de. **Técnicas de Controle de Robôs Móveis**. 2001. Mestrado em Engenharia Elétrica — Departamento de Automação e Sistemas – Universidade Federal de Santa Catarina.

OLIVEIRA, V. M. de; LAGES, W. F. Predictive Control of an Underactuated Brachiation Robot. In: IFAC SYMPOSIUM ON ROBOT CONTROL, 2006, Bologna, Italy. **Proceedings...** Bologna: Elsevier, 2006.

OLIVEIRA, V. M. de; LAGES, W. F. MPC Applied to Motion Control of an Underactuated Brachiation Robot. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES AND FACTORY AUTOMATION, 2006, Prague, Czech Republic. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2006.

OLIVEIRA, V. M. de; LAGES, W. F. Linear Predictive Control of a Brachiation Robot. In: IEEE CANADIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, 2006, Ottawa, Canada. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2006. p.1517–1520.

OLIVEIRA, V. M. de; LAGES, W. F. Controle de um Robô Bracejador Subatuado Utilizando NMPC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2006, Salvador, Brasil. **Anais...** SBA, 2006.

OLIVEIRA, V. M. de; LAGES, W. F. Controle Preditivo de um Robô Bracejador Subatuado Utilizando Linearização. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO – ENCONTRO DE ROBÓTICA INTELIGENTE, 2006, Campo Grande, Brazil. **Anais...** SBC, 2006.

OLIVEIRA, V. M. de; LAGES, W. F. Comparison Between Two Actuation Schemes for Underactuated Brachiation Robots. In: IEEE/ASME INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INTELLIGENT MECHATRONICS, 2007, Zurich, Switzerland. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2007.

OLIVEIRA, V. M. de; LAGES, W. F. Control of a Brachiation Robot with a Single Underactuated Joint Using Nonlinear Model Predictive Control. In: IFAC SYMPOSIUM ON SYSTEM, STRUCTURE AND CONTROL, 2007, Foz do Iguassu, Brazil. **Proceedings...** Foz do Iguassu: Elsevier, 2007.

ORIOLO, G.; NAKAMURA, Y. Control of Mechanical Systems with Second-Order Nonholonomic Constraints: underactuated manipulators. In: CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, 1991, Brighton, UK. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1991. p.2398–2403.

ORTEGA, R.; SPONG, M. W.; GÓMEZ-ESTERN, F.; BLANKENSTEIN, G. Stabilization of a Class of Underactuated Mechanical Systems via Interconnection and Damping Assignment. **IEEE Transactions on Automatic Control**, Piscataway, USA, v.47, n.8, p.1218–1233, Aug. 2002.

PEUNGSUNGWAL, S.; PUNGSIRI, B.; CHOMMONGTHAI, K.; OKUDA, M. Autonomous Robot for a Power Transmission Line Inspection. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS, 2001, Sydney, Australia. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2001. v.2, p.121–124.

PUGA, S. A.; AGUILAR, L. T. Hybrid Second-Order Sliding-Mode Tracking Control for Acrobot. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS AND CONTROL APPLICATIONS – ICIECA, 2005, Quito, Ecuador. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2005.

ROCHA, J.; SIQUEIRA, J. New Approaches for Surveillance Tasks. In: IFAC/EURON SYMPOSIUM ON INTELLIGENT AUTONOMOUS VEHICLES, 2004, Lisbon, Portugal. **Proceedings...** Lisbon: Elsevier, 2004.

ROSAS-FLORES, J. A.; ALVAREZ-GALLEGOS, J.; CASTRO-LINHARES, R. Stabilization of a Class of Underactuated Systems. In: CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, 2000, Sydney, Australia. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2000. p.2168–2173.

RUAUX, P. Mechanisation of the Installation of Aircraft Warning Spheres on Overhead Lines. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONSTRUCTION AND LIVE MAINTENANCE, 1995, Columbus, USA. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1995. p.125–131.

SAITO, F.; FUKUDA, T.; ARAI, F. Swing and Locomotion Control for Two-Link Brachiation Robot. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 1993, Atlanta, USA. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1993. v.2, p.719–724.

SAITO, F.; FUKUDA, T.; ARAI, F. Swing and Locomotion Control for Two-Link Brachiation Robot. **IEEE Control Systems Magazine**, Piscataway, USA, v.14, n.1, p.5–12, Feb. 1994.

SANCHEZ, E. N.; FLORES, V. Real-time Fuzzy PI+PD Control for an Underactuated Robot. In: IEEE SYMPOSIUM ON INTELLIGENT CONTROL, 2002, Glasgow, Scotland. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2002. p.137–141.

SANTAMARÍA, A. et al. Teleoperated Robots for Live Power Lines Maintenance (ROBTET). In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 1997, Birmingham, UK. **Proceedings...** Birmingham: IEE, 1997. n.438, p.3.31.1–3.31.5.

SAWADA, J.; KUSUMOTO, K.; MUNAKATA, T.; MAIKAWA, Y. A Mobile Robot for Power Transmission Lines. **IEEE Power Engineering Review**, Piscataway, USA, v.11, n.1, p.57, Jan. 1991.

SCHRAFT, R. D.; SCHMIERER, G. **Service Robots**. Natick, USA: A. K. Peters, 2000.

SCIAVICCO, L.; SICILIANO, B. **Modeling and Control of Robot Manipulators**. London, UK: McGraw-Hill, 1996. (Electrical and Computer Engineering).

SHIM, D. H.; KIM, H. J.; SASTRY, S. Decentralized Reflective Model Predictive Control of Multiple Flying Robots in Dynamic Environment. In: CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, 2003, Hawaii, USA. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2003.

SHIRIAEV, A. S.; KOLESNICHENKO, O. On Passivity Based Control for Partial Stabilization of Underactuated Systems. In: CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, 2000, Sydney, Australia. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2000. p.2174–2179.

SIQUEIRA, A. A. G. **Control  $\mathcal{H}_\infty$  Não-linear de Robôs Manipuladores Subatuados**. 2004. Doutorado em Engenharia Elétrica — Escola de Engenharia de São Carlos / Universidade de São Paulo.

SIQUEIRA, A. A. G.; TERRA, M. H. Control of Underactuated Manipulators Using Nonlinear  $\mathcal{H}_\infty$  Techniques. In: CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, 2002, Las Vegas, USA. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2002. p.2032–2037.

SLOTINE, J.-J. E.; LI, W. **Applied Nonlinear Control**. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1991.

SMITH, M. H.; LEE, M. A.; ULIERU, M.; GRUVER, W. A. Design Limitations of PD versus Fuzzy Controllers for the Acrobot. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 1997, Albuquerque, USA. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1997. v.2, p.1130–1135.

SMITH, M. H.; ZHANG, T.; GRUVER, W. A. Dynamic Fuzzy Control and System Stability for the Acrobot. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS - WORLD CONGRESS ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE, 1998, Alaska, USA. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1998. v.1, p.286–291.

SOUZA, A. de; MOSCATO, L. A.; SANTOS, M. F. dos; BRITO VIDAL FILHO, W. de; FERREIRA, G. A. N.; VENTRELLA, A. G. Inspection Robot For High-Voltage Transmission Lines. In: ABCM SYMPOSIUM SERIES IN MECHATRONICS, 2004, Rio de Janeiro, Brazil. **Proceedings...** Rio de Janeiro: ABCM, 2004. v.1.

SPELLUCCI, P. **Donlp2 Users Guide**. Darmstadt, Germany: Technical University of Darmstadt, Department of Mathematics, 1999.

SPONG, M. W. Swing Up Control for the Acrobot. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 1994, San Diego, USA. **Proceedings...**New York: IEEE Press, 1994. v.3, p.2356–2361.

SPONG, M. W. The Control of Underactuated Mechanical Systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS, 1994, Mexico City, Mexico. **Proceedings...**New York: IEEE Press, 1994.

SPONG, M. W. Partial Feedback Linearization of Underactuated Mechanical Systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS), 1994, Munich, Germany. **Proceedings...**New York: IEEE/RSJ, 1994. p.314–321.

SPONG, M. W. The Swing Up Control Problem for the Acrobot. **IEEE Control Systems Magazine**, Piscataway, USA, v.15, n.1, p.49–55, Feb. 1995.

SPONG, M. W. Underactuated Mechanical Systems. In: CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, 1997, San Diego, USA. **Proceedings...**New York: IEEE Press, 1997.

SPONG, M. W. **Control Problems in Robotics and Automation**. London, UK: Springer-Verlag, 1998. (Lecture Notes in Control and Information Sciences).

SPONG, M. W.; BLOCK, D. J. The Pendubot: a mechatronic system for control research and education. In: CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, 1995, New Orleans, USA. **Proceedings...**New York: IEEE Press, 1995. p.555–556.

SPONG, M. W.; VIDYASAGAR, M. **Robot Dynamics and Control**. USA: John Wiley & Sons, 1989.

SUZUKI, T.; MIYOSHI, W.; NAKAMURA, Y. Control of 2R Underactuated Manipulator with Friction. In: CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, 1998, Tampa, USA. **Proceedings...**New York: IEEE Press, 1998. p.2007–2012.

TANAKA, S. et al. Development of a Hot-Line Work Robot, "Phase II" and a Training System for Robot Operators. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONSTRUCTION OPERATION AND LIVE-LINE MAINTENANCE, 1998, Orlando, USA. **Proceedings...**New York: IEEE Press, 1998. p.147–153.

TARN, T.-J.; SANPOSH, P.; CHENG, D.; ZHANG, M. Output Regulation for Nonlinear Systems: some recent theoretical and experimental results. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, Piscataway, USA, v.13, n.4, p.605–610, July 2005.

TARN, T.-J.; ZHANG, M.; SERRANI, A. New Integrability Conditions for Differential Constraints. **System & Control Letters**, Oxford, UK, n.49, p.335–345, 2003.

TIAGOUNOV, A. A.; WEILAND, S. Model Predictive Control Algorithm for Nonlinear Chemical Processes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PHYSICS AND CONTROL, 2003, St. Petersburg, Russia. **Proceedings...**St. Petersburg: Computer Society Press, 2003. v.1, n.20-22, p.334–339.

UNECE. **Worldwide Growth in the Period 2004-2007**. Geneva, Switzerland: United Nations Economic Commission for Europe - World Robotics, 2004.

WALLER, J. B. **Concepts and Methodologies in Nonlinear Model Predictive Control**. Abo, Finland: Laboratory of Process Control - Department of Chemical Engineering - Abo Akademi Engineering, 2000.

WAN, Z.; KOTHARE, M. V. Efficient Scheduled Stabilizing Output Feedback Model Predictive Control for Constrained Nonlinear Systems. **IEEE Transaction on Automatic Control**, Piscataway, USA, v.49, n.7, p.1172–1177, July 2004.

WANG, H.-B.; WANG, Y.-L.; ZHAO, T.-S.; WANG, H.-R. Passivity-based Variable Structure Control of Two-Link Underactuated Robot. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE LEARNING AND CYBERNETICS, 2004, Shanghai, China. **Proceedings...**Shanghai: IEEE Press, 2004. p.496–499.

WANG, J.; THOMAS, G. A Model Based Predictive Control Scheme for Nonlinear Process. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 2006, Minneapolis, USA. **Proceedings...**Minneapolis: ACC, 2006. p.4842–4847.

WESSELOWSKI, K.; FIERRO, R. A Dual-Mode Model Predictive Controller for Robot Formations. In: CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, 2003, Hawaii, USA. **Proceedings...**New York: IEEE Press, 2003. p.3615–3620.

WICHLUND, K. Y.; SORDALEN, O. J.; EGELAND, O. Control Properties of Underactuated Vehicles. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 1995, Nagoya, Japan. **Proceedings...**Nagoya: IEEE Press, 1995. p.2009–2014.

XIN, X.; KANEDA, M. The Swing Up Control for the Acrobot Based on Energy Control Approach. In: CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, 2002, Las Vegas, USA. **Proceedings...**New York: IEEE Press, 2002. v.3, p.3261–3266.

YAMADA, K.; YUZAWA, A. Approximate Feedback Linearization for Nonlinear Systems and its Application to the Acrobot. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 2002, Anchorage, USA. **Proceedings...**Anchorage: ACC, 2002. p.1672–1677.

YAZICI, A.; KARAMANCIOGLU, A. Robust Stabilization of Acrobot Using its Real Unstructured Uncertainty Model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN SPACE TECHNOLOGIES – RAST, 2005, Istanbul, Turkey. **Proceedings...**New York: IEEE Press, 2005. p.265–270.

YONEMURA, T.; YAMAKITA, M. Swing Up Control of Acrobot Based on Switched Output Functions. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE SOCIETY OF INSTRUMENT AND CONTROL ENGINEERS, 2004, Sapporo, Japan. **Proceedings...**Sapporo: SICE, 2004. v.3, p.1909–1914.

ZHANG, M.; TARN, T.-J. A Hybrid Switching Control Strategy for Nonlinear and Underactuated Mechanical Systems. **IEEE Transactions on Automatic Control**, Piscataway, USA, v.48, n.10, p.1777–1782, Oct. 2003.