

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Fabian Andres
Lara Molina..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 02/1/08.....

João Maurício Rosário
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**AMBIENTE DE SIMULAÇÃO DE
MANIPULADORES PARALELOS:
MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE
DE UMA PLATAFORMA STEWART**

Autor: Fabian Andres Lara Molina
Orientador: Prof. Dr. João Maurício Rosário

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

**AMBIENTE DE SIMULAÇÃO DE
MANIPULADORES PARALELOS:
MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE
DE UMA PLATAFORMA STEWART**

Autor: **Fabian Andres Lara Molina**
Orientador: **Prof. Dr. João Maurício Rosário**

Curso: Engenharia Mecânica
Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Campinas, 2008
SP-Brasil

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

L32a	<p>Lara Molina, Fabian Andres</p> <p>Ambiente de simulação de manipuladores paralelos: modelagem, simulação e controle de uma plataforma Stewart / Fabian Andres Lara Molina. --Campinas, SP: [s.n.], 2008.</p> <p>Orientador: João Maurício Rosário</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.</p> <p>1. Simulação e modelagem. 2. Robótica. 3. Controle automático. I. Rosário, João Maurício.. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.</p>
------	---

Titulo em Inglês: Simulation environmental for parallel manipulator: modeling simulation and control of Stewart platform

Palavras-chave em Inglês: Parallel manipulators, Stwart platform, Modeling simulation, Robotic, Automoaatic control

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Niederauer Mastelari, Carlos Raimundo Erig Lima

Data da defesa: 02/09/2008

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

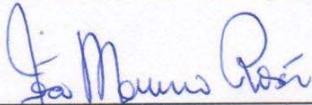
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

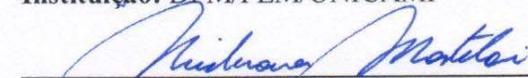
**AMBIENTE DE SIMULAÇÃO DE
MANIPULADORES PARALELOS:
MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE
DE UMA PLATAFORMA STEWART**

Autor: **Fabian Andres Lara Molina**
Orientador: **Prof. Dr. João Maurício Rosário**

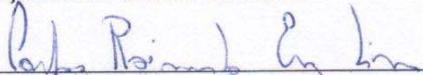
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. João Maurício Rosário
Instituição: DPM/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Niederauer Mastelari
Instituição: DPM/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Carlos Raimundo Erig Lima
Instituição: UTFPR/Curitiba

Campinas, 2 de setembro de 2008

*Porque eu, o SENHOR, teu Deus, te tomo pela tua mão direita e te digo:
não temas, que eu te ajudo
Isaias 41, 13*

Dedicatória:

Dedicado a mi amada familia: Pa, Ma, Andrea y Felipe.

Agradecimentos

Presto minha gratidão às pessoas que contribuíram na realização deste trabalho e do mestrado:

Ao meu Orientador, Prof. Dr. João Mauricio Rosário, pela orientação no decorrer do mestrado todo.

Aos meus caros irmãos e amigos em Campinas e São Paulo, por toda a assistência, os momentos compartilhados e carinho recebido.

Al Prof. Dr. Oscar Avilés Sánchez, por la amistad, las puertas abiertas, el apoyo, las correcciones y enseñanzas recibidas durante la maestría y a lo largo de toda mi trayectoria académica y profesional.

Aos professores e colegas do departamento que ajudaram de forma direta e indireta na elaboração deste trabalho.

Resumo

LARA, Fabian Andrés, Ambiente de Simulação de Manipuladores Paralelos: Modelagem, Simulação e Controle de uma Plataforma Stewart, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 171 p. Dissertação (Mestrado)

O presente trabalho recopila e aplica conceitos concernentes à modelagem dos manipuladores paralelos, desta maneira é proposta um ambiente de simulação para manipuladores paralelos aplicada à Plataforma Stewart.

O manipulador paralelo de seis graus de liberdade - Plataforma Stewart é utilizado em aplicações que requerem alto desempenho de posicionamento: alta rigidez, alta razão capacidade de carga - peso do manipular, alta exatidão no movimento. Entre as aplicações nas quais se tem utilizado a Plataforma Stewart estão: simuladores de vôo, manipuladores cirúrgicos, máquinas ferramentas CNC, sistemas de locomoção bípedes, etc.

São enfatizados aspectos concernentes à modelagem cinemática e dinâmica deste manipulador. A partir do modelo é proposta a simulação e controle de posição no espaço das juntas em MATLAB – Simulink™. A validação da simulação é feita mediante um estudo de casos.

Palavras Chave

1. Manipuladores Paralelos.
2. Plataforma Stewart.
3. Modelagem.
4. Simulação.
5. Controle.

Abstract

LARA, Fabian Andrés, Simulation Environment for Parallel Manipulator: Modeling, simulation and control of Stewart Platform, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 171 p. Dissertação (Mestrado)

The present work involves and applies parallel manipulator design concepts; therefore it is proposed a parallel manipulator design methodology applied to Stewart Platform.

In this research project, it is modeled, simulated and analyzed the six degrees of freedom parallel manipulator - Stewart Platform. This system is used on applications with high position performance: high stiffness, high useful load – manipulator weigh and high accuracy. The Stewart Platform has been applied in: flight simulators, surgery manipulators, CNC machines, biped locomotion systems, etc.

In this work are emphasized on Stewart Platform cinematic and dynamic modeling concepts. Based on manipulator model is proposed the simulation and joint space position control in MATLAB – SimulinkTM. The simulation is validated thought a case study.

Key words

1. Parallel Manipulators 2. Stewart Platform 3. Modeling 4. Simulation 5. Control

Índice

Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas.....	xviii
Nomenclatura.....	xix
1. Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	2
1.2 Objetivos do trabalho.....	2
1.3 Metodologia.....	3
1.4 Descrição dos Capítulos	5
2. Revisão da literatura.....	7
2.1 Sistemas Robóticos	8
2.1.1 Classificação de manipuladores robóticos.....	9
2.1.2 Comparação entre Manipulador serial e Paralelo	10
2.2 Manipuladores Paralelos	13
2.2.1 Manipuladores de 3 Graus de Liberdade.....	13
2.2.2 Manipuladores de 4 Graus de Liberdade.....	15
2.2.3 Manipuladores de 5 Graus de Liberdade.....	16
2.2.4 Manipuladores de 6 Graus de Liberdade.....	17
2.2.5 Exemplos de aplicação dos manipuladores paralelos	18
2.3 Simuladores Robóticos.....	20

2.3.1 Simulação Gráfica baseada na cinemática.....	22
2.3.2 Simulação Numérica baseada na dinâmica	23
2.3.3 Verificação e Validação em Simuladores Robóticos	23
2.3.4 Simuladores para Manipuladores Paralelos	24
2.4 Simuladores e ferramentas de projeto para Plataforma de Stewart.....	26
2.4.1 Ferramentas para concepção e projeto.....	26
2.4.2 Simuladores da modelagem cinemática	30
2.4.3 Simulação da Dinâmica da Plataforma de Stewart.....	33
2.4.4 Simulação de Controladores aplicados à Plataforma de Stewart.....	36
2.5 Considerações Finais.....	38
3. Modelagem do Manipulador Plataforma de Stewart (MPS).....	40
3.1 Origens da Plataforma de Stewart	42
3.2 Exemplos de aplicações da Plataforma Stewart	45
3.2.1 Simuladores de vôo.....	45
3.2.2 Sistemas de locomoção bípedes.....	46
3.2.3 Maquinas ferramentas com estrutura paralela	46
3.2.4 Dispositivos hápticos.....	48
3.3 Modelo Cinemático	49
3.3.1 Comparação do modelo MPS e Manipuladores Seriais.....	49
3.3.2 Graus de liberdade.....	50
3.3.3 Geometria do Manipulador	51
3.3.4 Cinemática inversa.....	53
3.3.5 Jacobiano	55
3.3.6 Modelo cinemático direto a partir do Jacobiano Inverso.....	56
3.3.7 Modelo Estático	57

3.4 Análise Cinemático do MPS	58
3.4.1 Análise das Singularidades	58
3.4.2 Avaliação de trajetória	61
3.4.3 Análise do volume de trabalho	62
3.5 Considerações Finais	64
4. Implementação de Ambiente de Simulação Cinemática e Controle no Espaço das Juntas	65
4.1 Projeto de Ambiente de Simulação	66
4.2 Projeto de Simulador cinemático	67
4.2.1 Representação geométrica e cinemática do MPS	69
4.2.2 Trajetória no espaço de trabalho	73
4.2.3 Volume de trabalho	75
4.3 Simulação Dinâmica	76
4.4 Considerações finais	77
5. Modelagem do Sistema de Acionamento e Controle	78
5.1 Modelo dinâmico associado ao manipulador MPS e atuadores	80
5.1.1 Modelagem de Atuadores lineares	80
5.1.2 Modelo dinâmico do manipulador	84
5.2 Arquitetura de controle no espaço das Juntas	89
5.3 Considerações finais	90
6. Validação do simulador através do Estudo de Casos	91
6.1 Caso I: Simulação de um MPS Petrobras	92
6.2 Caso II: Dispositivo Robótico para manipulação de ferramentas	96
6.3 Caso III: Controle no espaço das juntas	100
6.3.1 Definição geométrica e cinemática	101

6.3.2 Tarefa I	103
6.3.3 Tarefa II	107
6.3.4 Tarefa III	111
6.4 Considerações finais.....	114
7. Conclusões e Perspectivas futuras.....	116
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
ANEXO I.....	124
ANEXO II	128
ANEXO III.....	137
ANEXO IV	142
ANEXO V	146

Lista de figuras

Figura 1: Metodologia proposta no presente trabalho.....	3
Figura 2: Elementos de um sistema Robótico	8
Figura 3: Manipulador Paralelo e Serial	9
Figura 4: Manipulador hibrido (ROBOTICS RESEARCH CENTER, NANYANG TECHNOLOGICAL UNIVERSITY).....	10
Figura 5: Manipuladores com 3 Graus de Liberdade – translação	14
Figura 6: Manipuladores com 3 Graus de Liberdade – orthoglide (Pashkevich et al., 2006).	14
Figura 7: Manipuladores com 3 Graus de Liberdade – rotação (GOSSELIN et al. 1999)..	15
Figura 8: Manipuladores com 4 Graus de Liberdade – 3 translações e 1 rotação.	16
Figura 9: Manipuladores com 5 Graus de Liberdade	17
Figura 10: Manipuladores paralelos de seis graus de liberdade	18
Figura 11: Manipuladores Paralelos - Aplicações Médicas	19
Figura 12: Manipuladores Paralelos - Aplicações Industriais.....	20
Figura 13: Toolbox para Manipuladores Paralelos proposto por (SAPIO, 1998).....	26
Figura 14: Simulação de uma plataforma de Stewart através do 20SIM.....	27
Figura 15: Simulação de uma plataforma de Stewart através do Software ITI SimulationX	28
Figura 16: Transformação do modelo CAD a SimMechanics™ (Mathworks, Inc.)	29
Figura 17: Simulação de uma plataforma de Stewart através do Mathworks.	29
Figura 18: Simulação da cinemática, FALCO	30
Figura 19: Simulação de uma plataforma de Stewart através do ZHANG, CHEN, 2007... 	31
Figura 20: Simulador de Movimentos de plataforma de Stewart (ROSARIO et al., 2007). 32	

Figura 21: Representação esquemática de uma Plataforma de Stewart em SimMechanics™ (NADIMI et al., 2006)	35
Figura 22: Manipulador Plataforma de Stewart	40
Figura 23: Plataforma de Stewart com configuração <i>E-P-E</i>	41
Figura 24: Plataforma de Stewart com configuração <i>E-P-U</i>	41
Figura 25: Plataforma para movimento projetada em 1928 (GWINNETT,1931)	42
Figura 26: Robô de Pollard, Primeiro Robô paralelo industrial (POLLARD, 1940)	43
Figura 27: Plataforma Gough (GOUGH, 1962)	43
Figura 28: Plataforma de Stewart (STEWART, 1965)	44
Figura 29: Simulador de movimentos de Cappel (CAPPEL, 1967)	44
Figura 30: Sistema de movimento do Simulador de vôo SIMONA	45
Figura 31: Sistema de locomoção bípede WL-16RII (SUGAHARA et al. , 2005)	46
Figura 32: (CYCU) Gough–Stewart-type CNC machine. (TMG et al. 2004)	47
Figura 33: Plataforma de Stewart para neuroendoscopia (WAPLER et. al. , 2003)	48
Figura 34: CRIGOS Robo Brandt et al. (1999)	49
Figura 35: Geometria Manipulador Plataforma de Stewart	51
Figura 36: Definição geométrica do Manipulador	52
Figura 37: Representação Vetorial da Cadeia Cinematoca do Manipulador	54
Figura 38: Trajetórias perto de regiões Singulares	62
Figura 39: Região onde os links podem alcançar	64
Figura 40: Diagrama da ferramenta desenvolvida	65
Figura 41: Implementação Ambiente de Simulação	66
Figura 42: Tela gráfica do simulador cinemática	68
Figura 43: Caso 1: 3-3 MPS	70
Figura 44: Localizações do MPS para o caso 1	70
Figura 45: Colisão entre pernas	71
Figura 46: Caso 2, 6-3 MPS	71
Figura 47: Localizações do MPS para o caso 2	72
Figura 48: Caso 3, 6-6 MPS	72
Figura 49: Posição e orientação do MPS para caso 3	73
Figura 50: Articulações passivas fora do limite	73

Figura 51: Espaço das Juntas para Trajetoria Linear	74
Figura 52: Trajetórias das variáveis articulares.....	74
Figura 53: Trajetórias das variáveis de juntas – Número de Condição.....	75
Figura 54: Volume de trabalho constante para um MPS	75
Figura 55: Volume de trabalho para o MPS a partir da alteração de r_a.....	75
Figura 56: Tela da simulação dinâmica.....	76
Figura 57: Diagrama geral do sistema de acionamento e controle.....	79
Figura 58: Atuador linear	80
Figura 59: Diagrama do atuador.....	81
Figura 60: Conversão de torque para força no parafuso sem fim.....	81
Figura 61: Diagrama de Blocos - Motor de corrente contínua.....	82
Figura 62: Diagrama de Blocos correspondente ao modelo dinâmico de um MPS.....	88
Figura 63: Estrutura de controle no espaço das juntas.....	89
Figura 64: Protótipo desenvolvido para PETROBRAS (Mazoni, 2003).....	92
Figura 65: Trajetoria no espaço de trabalho MPS – PETROBRAS.....	93
Figura 66: Modelo Geométrico e trajetória MPS – PETROBRAS.....	94
Figura 67: Trajetoria no espaço das juntas MPS PETROBRAS.....	94
Figura 68: Número de condição MPS PETROBRAS.....	95
Figura 69: Volume de trabalho MPS PETROBRAS.....	95
Figura 70: Manipulador Fanuc – 200ib.....	96
Figura 71: Animação Gráfica de movimentos de um MPS FANUC - 200iB	98
Figura 72: Trajetoria realizada no espaço de trabalho FANUC - 200iB.....	98
Figura 73: Velocidades e acelerações na trajetória MPS FANUC – 200 iB	99
Figura 74: Trajetória no espaço das juntas, FANUC – 200 iB.....	99
Figura 75: Número de condição FANUC -200 iB	100
Figura 76: MPS AI-HEX-HR8 (ALIO INDUSTRIES).....	101
Figura 77: Modelo Geométrico MPS – AI-HEX-HR8.....	102
Figura 78: Animação do movimento para a trajetória de referencia $P(t)$- tarefa I	103
Figura 79: Trajetória no espaço de trabalho $P(t)$ - tarefa I.....	104
Figura 80: Velocidades $P(t)$, e acelerações $P(t)$ - tarefa I.....	104
Figura 81: Número condição - tarefa I	104

Figura 82: Trajetoria no espaço das juntas e saída controlada - TAREFA I	105
Figura 83: Referencia $l(t)$ e saída $l_d(t)$ nas juntas –tarefa I	106
Figura 84: Trajetória de saída no espaço de trabalho $P_0(t)$ – tarefa I	106
Figura 85: Trajetória no espaço de trabalho $P(t)$ – tarefa II	107
Figura 86: Velocidades $P(t)$, e acelerações $P(t)$ - tarefa II	108
Figura 87: Número condição - tarefa II	108
Figura 88: Referencia para as juntas ∂l e a saída nas juntas ∂l_d - tarefa II	109
Figura 89: Referencia $P(t)$ e saída $P_0(t)$ no espaço de trabalho –tarefa II	109
Figura 90: Velocidades $P(t)$, e acelerações $P(t)$ aumentados quatro vezes - tarefa II	110
Figura 91: Referencia $P(t)$ e saída $P_0(t)$ no espaço de trabalho (tarefa II)	110
Figura 92: Animação do movimento para a trajetória de referencia $P(t)$- tarefa III	111
Figura 93: Avaliação do número condição na execução de uma trajetoria - tarefa II	112
Figura 94: Referencia $P(t)$ e saída $P_0(t)$ no espaço de trabalho – tarefa III	112
Figura 95: $P(t)$ e $P_0(t)$ com $N=200$ – tarefa III	113
Figura 96: $P(t)$ e $P_0(t)$ a partir da variação dos ganhos de um PID – tarefa III	114
Figura 97: Localização de um corpo rígido	128
Figura 98: Vetor de posição em três eixos	129
Figura 99: Rotações sucessivas nos eixos fixos	131
Figura 100: Gerador de Trajetórias do Manipulador	134
Figura 101: Trajetória linear	135
Figura 102: Trajetória Circular	136
Figura 103: Configuração com colisão entre ligamentos	137
Figura 104: Ligamentos Paralelos	138
Figura 105: Ligamentos que se cruzam	139
Figura 106: Angulos de articulações passivas no atuador	140
Figura 107: Componentes do atuador linear	142
Figura 108: Saída motor para $u(t) = 24v$	143
Figura 109: Saída do atuador para $u(t) = 100 m$	145
Figure 110: Execução simulação cinemática	146
Figure 111: Execução simulação dinamica	147

Figura 112: Simulação dinâmica em SIMULINK 148

Lista de tabelas

Tabela 1: Comparação entre Manipuladores Serial e MPS	12
Tabela 2: Comparação entre modelo de Manipuladores Serial e MPS.....	50
Tabela 3: Parâmetros que definem a geometria do manipulador	52
Tabela 4: Funções do Simulador Cinemático.....	69
Tabela 5: Parâmetros do simulador dinâmico	77
Tabela 6: Parâmetros motor	82
Tabela 7: Parâmetros manipulador PETROBRAS.....	93
Tabela 8: Parâmetros manipulador FANUC – 200ib.....	97
Tabela 9: Parâmetros da trajetória MPS FANUC -200iB	98
Tabela 10: Parâmetros geometricos	101
Tabela 11: Massas e inércias MPS	102
Tabela 12: Parâmetros do atuador linear.....	102
Tabela 13: Parâmetros trajetória circular – TAREFA I	103
Tabela 14: Parâmetros controlador tarefa I	105
Tabela 15: Parâmetros do controlador tarefa II.....	108
Tabela 16: Ganhos de controlador – tarefa III	112
Tabela 17: Ganhos de controlador – tarefa III	113
Tabela 18: Valores nominales motor MAXON RE 35	142
Tabela 19: Parâmetros Motor MAXON RE 35	143
Tabela 20: Parâmetros do redutor MAXON 338006.....	144
Tabela 21: Parâmetros do parafuso MAXON 339469.....	144

NOMENCLATURA

Letras Latinas

\vec{A}_l	(3x1)	Vetores da plataforma móbil
\vec{B}_l	(3x1)	Vetores da base fixa
B_m	(1x1)	Atrito viscoso do motor
C	(3x1)	Centróide da Plataforma móbil
$C_a(\vec{P}, \dot{\vec{P}})$	(6x6)	Matriz de Coriolis
d_a	(1x1)	Radio das pernas extensíveis
$\partial \vec{l}$	(6x1)	Incrementos nas juntas do ponto i ao ponto $i+1$
W	(3x1)	Sistema de referencia total
F_i	(3x1)	Força nos atuadores
f_i	(3x1)	forças de reação na articulação superior dos atuadores
g	(1x1)	Gravidade
G	(1x1)	Graus de liberdade
g_i	(1x1)	Graus de movimento relativo permitidos pela articulação i
g_p	(1x1)	Graus de liberdade passivos do mecanismo

$G(\vec{P})$	(6x1)	Vetor de efeitos gravitacionais
I	(3x3)	Matriz idêntica
I_a	(3x3)	Tensor de inércia da plataforma móvel
$i(t)$	(1x1)	Corrente de armadura
j	(1x1)	Número de articulações do mecanismo
j_i	(1x1)	Número de articulações com i graus de liberdade
J_m	(1x1)	Inércia do motor
k	(1x1)	Número de condição
K_T	(1x1)	Constante de torque de motor
K_N	(1x1)	Constante de força eletromotriz
\vec{l}	(6x1)	Vetor correspondente aos comprimentos de referência dos atuadores
\vec{l}_d	(6x1)	Vetor correspondente aos comprimentos de saída dos atuadores
L_a	(1x1)	Indutância na armadura do motor
l_i	(1x1)	Cumprimento de do atuador correspondente à perna i
l_{max}	(1x1)	Cumprimento limite máximo dos atuadores
l_{min}	(1x1)	Cumprimento limite mínimo dos atuadores
$l_{di}(t)$	(1x1)	Cumprimento do atuador considerado a dinâmica do sistema
m_a	(1x1)	Massa da Plataforma e da carga
$M_a(\vec{P})$	(6x6)	Matiz de inércia
O	(3x1)	Sistema referencia da base fixa
\vec{p}	(3x1)	Posição da plataforma móvel respeito ao sistema de referencia O

\vec{P}	(6x1)	Posição e orientação da plataforma móvel
\vec{P}_I	(6x1)	Posição e orientação do manipulador respeito ao sistema de referencia total
PT	(1x1)	Passo do parafuso
\underline{R}	(3x3)	Matriz de rotação da plataforma móvel
R_a	(1x1)	Resistência na armadura
r	(1x1)	Raio do parafuso
r_a	(1x1)	Raio da plataforma móvel
r_b	(1x1)	Raio da base do manipulador
s_i	(3x1)	vetor unitário na direção do atuador
S_{imax}	(1x1)	Limite máximo da esfera do volume de trabalho
S_{iminx}	(1x1)	Limite mínimo da esfera do volume de trabalho
T_m	(1x1)	Torque no motor
T_d	(1x1)	Torque de perturbação
V_C	(3x1)	Velocidade linear na plataforma móvel
$v(t)$	(1x1)	Voltagem de armadura

.....

Letras Gregas

α	(1x1)	Yaw, Ângulo rotação no eixo z
β	(1x1)	Pitch, Ângulo rotação no eixo y
θ	(1x1)	Posição do rotor do motor

γ	(1x1)	Roll, Ângulo rotação no eixo x
λ	(1x1)	Graus de liberdade no do espaço no qual o mecanismo tem a intenção de trabalhar
ϕ	(1x1)	Ângulo para o vetor \vec{A}_i
ψ	(1x1)	Ângulo para o vetor \vec{B}_i
ω_C	(1x1)	Velocidade angular na plataforma móvel
$\tilde{\omega}_C$	(3x3)	Matriz antisimetria da velocidade angular em C

.....

Abreviações

CAD	Computer-Aid Desing
DOF	Degees of freedom
DVS	Decomposição de valor singular
E	Articulação Esférica
FEA	Finite Element Analysis
IGRIP	Interactive Graphics Robot Instruction Porogram
MSP	Manipulador Plataforma de Stewart
P	Articulação Prismática
U	Articulação universal
3D	Três dimensões

Capítulo 1

Introdução

Manipuladores robóticos paralelos são sistemas complexos, cuja modelagem matemática envolve o desenvolvimento de equações relacionadas à cinemática, dinâmica e controle (GOSSELIN et al., 1999). Manipuladores de estrutura paralela baseados na Plataforma de Stewart são sistemas cujo funcionamento e projeto não são intuitivos, tornando-se imprescindível a utilização de ferramentas de projeto, concepção e simulação que envolva os conceitos próprios a manipulador robótico, permitindo assim avaliar o desempenho de um protótipo de manipulador antes de ser construído. A partir da modelagem e simulação de um manipulador robótico, a eficiência do projeto pode ser melhorada, implicando em reduções de tempos de implementação e custos de manufatura. (DEMETRIOU; LAMBERT , 2005).

Dentre as diferentes aplicações de sistemas de posicionamento utilizando dispositivos robóticos paralelos do tipo plataforma de Stewart podemos destacar: simuladores de vôo (ADVANI et al., 2002), máquinas ferramentas (TMG et al., 2004), manipuladores cirúrgicos (WAPLER et al., 2003), (WENDLANDT; SASTRY, 1994) e sistemas de locomoção bípedes (SUGAHARA et al., 2005) entre outros.

Ao mesmo tempo, a simulação e modelagem de manipuladores robóticos têm sido uma área de grande interesse e desenvolvimento na robótica, e com o avanço da robótica surgem novas ferramentas computacionais de modelagem e simulação.

Os simuladores de manipuladores robóticos constituem-se de ferramentas de análise e projeto, e dentre as principais justificativas de utilização dessas ferramentas podemos destacar:

- a) Dimensionamento estrutural do manipulador com possibilidade de estudo de diferentes protótipos sem necessidade de construção física,
- b) Projeto e implementação de diferentes estratégias de controle a partir da dinâmica do manipulador,
- c) Programação e simulação das tarefas a serem executadas pelo manipulador.

1.1 Motivação

A utilização de manipuladores robóticos com mecanismos paralelos em aplicações industriais tem sido muito empregada nas últimas décadas, principalmente como solução para sistemas de posicionamento, se evidenciado a implementação de metodologias para desenvolvimento de ferramentas de simulação e análise computacional para construção de protótipos baseadas nas condições de operação e funcionalidades estabelecidas através das especificações do projeto.

Assim, para a implementação de novos protótipos de um Manipulador Plataforma de Stewart (MPS) torna-se imprescindível a utilização de ferramentas dedicadas especificamente a este tipo de manipulador, que permita avaliar o seu desempenho através de ambiente de simulação antes de ser construído.

1.2 Objetivos do trabalho

O presente trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta de projeto dedicada à concepção de um Manipulador Plataforma de Stewart (MPS). Conseqüentemente, a finalidade desta ferramenta de projeto é modelar, simular e analisar o desempenho cinemático do Manipulador Plataforma de Stewart, visando ao projeto de um controlador de posição no espaço das juntas.

Para atingir os principais objetivos delineados neste trabalho, é proposta a implementação através de um ambiente de simulação de diversas tarefas a serem executadas pelo manipulador em estudo, a partir do desenvolvimento das seguintes etapas:

- Revisão da modelagem cinemática do MPS, onde são encontradas as expressões analíticas correspondentes à solução para a cinemática inversa do mesmo.
- Desenvolvimento de rotinas computacionais para simulação e análise cinemática do MPS, baseados no modelo cinemático.
- Implementação de um controlador de posição para juntas robóticas, baseado no modelo dinâmico dos atuadores e efeitos dinâmicos do mecanismo.
- Estudo de casos para diferentes protótipos de um manipulador (MPS), com avaliação do desempenho cinemático e do controle de posição no espaço das juntas.

1.3 Metodologia

Nos próximos capítulos dessa Dissertação de Mestrado serão apresentadas as principais etapas para desenvolvimento desse trabalho de pesquisa, obedecendo os passos, mostrados na figura 1 para atingir os objetivos inicialmente estabelecidos.

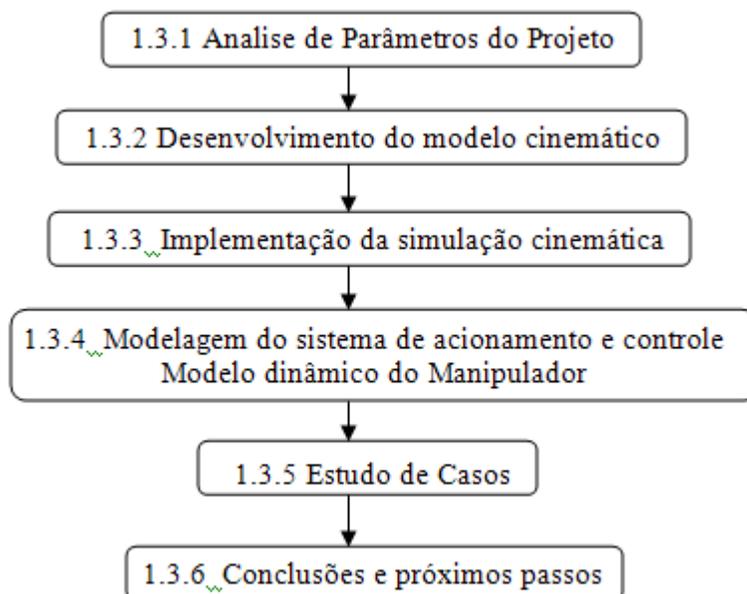


Figura 1: Metodologia proposta no presente trabalho.

1.3.1 Análise de Parâmetros de projeto

Nesta etapa foi realizado um trabalho de revisão do estado da arte dos manipuladores paralelos com a finalidade de fornecer ao leitor uma visão geral da evolução da robótica nesta área. O Manipulador Plataforma de Stewart (MPS) é introduzido no contexto dos manipuladores paralelos.

Neste trabalho de revisão foi também enfatizado o estudo de simuladores de manipuladores paralelos considerando-se especialmente naqueles desenvolvidos para o MPS, sendo discutidas algumas características inerentes a estes simuladores.

Assim, a partir da revisão do estado da arte em manipuladores e nos simuladores de manipuladores paralelos, são determinadas as características que devem ser contempladas no desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a análise cinemática e o projeto de um sistema de controle da posição do manipulador no espaço das juntas.

1.3.2 Desenvolvimento de modelo cinemático

Nesta etapa é realizado um trabalho de revisão enfatizando os principais conceitos associados ao MPS, abordando assuntos relacionados à definição, funcionamento, principais aplicações e diferenças relacionadas ao modelo dos manipuladores seriais.

Para implementação de um simulador de um MPS, torna-se imprescindível o desenvolvimento de um modelo cinemático completo desse manipulador com ênfase no modelo cinemático inverso, o desenvolvimento do Jacobiano direto e inverso, a análise das singularidades e volume de trabalho e análise estática. A partir do desenvolvimento desse equacionamento torna-se possível a implementação de rotinas para simulador cinemático.

1.3.3 Implementação da simulação cinemática

Para a implementação da simulação cinemática foi desenvolvido um aplicativo que permitiu introduzir as especificações do movimento a ser realizado pelo MPS. Este mesmo aplicativo permitiu a visualização das animações dos movimentos, a análise dos parâmetros cinemáticos que determinam o rendimento do manipulador, como também a geração das trajetórias de referencia para o controle dos atuadores.

1.3.4 Modelagem do sistema de acionamento e controle

Nesta etapa foi desenvolvido o modelo e simulação da dinâmica do manipulador, a partir da análise dos efeitos dinâmicos e modelo dinâmico dos atuadores e do manipulador.

O sistema de controle foi realizado para as variáveis articulares do manipulador, que no caso do MPS é o comprimento (extensão e distensão) dos atuadores. O controlador de posição baseado na dinâmica foi implementado independentemente para cada grau de liberdade do manipulador. Os sinais de referência para o controle de posição de cada junta são determinados a partir do simulador cinemático descrito anteriormente. Conseqüentemente

1.3.6 Estudo de casos

Foram planejados estudos de casos nos quais foi avaliada e validada o ambiente de simulação proposto.

1.3.5 Conclusões e próximos passos

A partir do estudo de casos onde os passos anteriores foram aplicados são propostas as conclusões e possíveis contribuições e melhorias para continuidade desse trabalho de pesquisa.

1.4 Descrição dos Capítulos

Esta dissertação de mestrado foi subdividida em seis capítulos, onde no primeiro capítulo foi apresentado a introdução, metodologia de desenvolvimento e principais objetivos enfatizados nesse trabalho de pesquisa.

No segundo capítulo foi realizada uma revisão bibliográfica aprofundada dos trabalhos mais importantes desenvolvidos nesta área, abordando conceitos importantes de manipuladores paralelos e simulação de manipuladores robóticos, com ênfase nos simuladores para manipuladores paralelos e Manipulador Plataforma de Stewart (MPS).

No terceiro capítulo são apresentados o modelo matemático estabelecido a partir de uma revisão bibliográfica direcionada ao modelo do MPS.

No quarto capítulo desta dissertação de mestrado é apresentado o projeto e simulação do MPS baseado no modelo proposto no capítulo anterior.

No quinto capítulo foi desenvolvido o modelo do sistema de acionamento e controle do MPS, enquanto no sexto capítulo desse trabalho concerne a validação do simulador e sistema de controle a partir da apresentação de estudo de casos.

Finalmente, no capítulo sete deste trabalho são discutidos e analisados os principais resultados obtidos nos capítulos anteriores, sendo propostas sugestões de trabalhos futuros que assegurem a continuidade das investigações desenvolvidas nessa dissertação de mestrado.

Capítulo 2

Revisão da literatura

Para atingir o escopo principal delineado nesse capítulo foi realizado um trabalho de revisão de literatura sobre manipuladores paralelos e simuladores de manipuladores robóticos, com ênfase no Manipulador Plataforma de Stewart (MPS). Para uma maior compreensão do leitor, este trabalho de revisão bibliográfica foi subdividido em três seções distintas.

Na primeira seção são discutidos os conceitos e definições de manipuladores paralelos com a finalidade de estabelecer um marco de referencia para a compreensão de seu principio de funcionamento e principais aplicações industriais dos manipuladores paralelos.

A segunda seção foi realizada uma breve revisão dos conceitos fundamentais de simuladores para manipuladores robóticos, sendo apresentada posteriormente uma revisão de exemplos de simuladores para manipuladores paralelos, e finalmente na terceira seção é apresentada alguns trabalhos encontrados na literatura que envolve a simulação de uma Plataforma de Stewart.

Nestes trabalhos, abordando o tema de simuladores de Plataforma de Stewart, encontram-se: ferramentas de projeto e simulação aplicadas para estes dispositivos, simulação da cinemática, modelagem e simulação das equações dinâmicas e simulação de técnicas de controle para a Plataforma de Stewart.

2.1 Sistemas Robóticos

Um sistema robótico consiste normalmente dos seguintes elementos: manipulador (sistema mecânico), efetuator final, sistema de acionamento e controle de atuadores, computador e um sistema de visão ou outra classe de sensor.



Figura 2: Elementos de um sistema Robótico

O manipulador mecânico é constituído de vários links interligados através de articulações. Na figura 2 é apresentado um manipulador robótico do tipo serial onde o link da base é fixo e as articulações entre os links são atuadas. Ele possui as seguintes características:

- Um link é fixo a um sistema de referência, enquanto os outros são designados como links de saída.

- Algumas articulações no manipulador são atuadas, outras são passivas.
- O número de articulações atuadas é igual ao número de graus de liberdade do manipulador.

O efetuator final é um dispositivo adicionado ao link de saída do manipulador para apreensão, transporte ou manipulação de peças de trabalho. O efetuator final pode ser visto como uma interface entre o manipulador mecânico e o ambiente de atuação do manipulador.

O controlador pode ser constituído de um simples controlador PID de baixo nível a um controlador de alto nível baseado no modelo de um sistema de controle inteligente. Encoders ou tacômetros são instalados nas juntas do manipulador para medir o movimento relativo entre dois corpos ligados, permitindo assim, a implementação de um sistema de controle realimentado independente para cada junta do manipulador.

2.1.1 Classificação de manipuladores robóticos

Os manipuladores robóticos podem ser classificados dependendo de vários critérios, dentre eles, o número de graus de liberdade, estrutura cinemática, geometria do espaço de trabalho e características do movimento. No presente trabalho será enfatizado à classificação de um manipulador robótico segundo a sua estrutura cinemática. A figura 3 apresenta exemplos industriais de manipuladores do tipo paralelo e serial.



(a) Manipulador Paralelo, Plataforma de Stewart MPS (Andreff; Dallej; Martinet, 2007)



(b) Manipulador Serial KR-3 KS (KUKA robot Group)

Figura 3: Manipulador Paralelo e Serial

Um manipulador pode ser classificado de acordo com a forma de sua estrutura cinemática, ou seja:

- a) Serial ou manipulador de cadeia aberta: estrutura cinemática possui a forma de cadeia cinemática aberta,
- b) Paralelo: constituído de cadeias cinemáticas fechadas,
- c) Híbrido: constituídas de cadeias cinemáticas abertas e fechadas.

A figura 4 apresenta um manipulador robótico composto na base de uma estrutura paralela com três graus de liberdade e um braço robótico com quatro graus de liberdade disposto sobre esta base.



Figura 4: Manipulador híbrido (ROBOTICS RESEARCH CENTER, NANYANG TECHNOLOGICAL UNIVERSITY).

2.1.2 Comparação entre Manipulador serial e Paralelo

A comparação destes dois tipos de manipuladores é realizada basicamente em termos de suas características mecânicas e problemas de controle para determinar em que tipo de tarefas cada manipulador pode ser utilizado com vantagem.

Em termos mecânicos, os manipuladores seriais são constituídos de atuadores nas suas partes móveis, implicando em massas e momentos de inércia relativamente altos (sistema rígido). Nos manipuladores paralelos, todos os atuadores são montados próximos a base, possibilitando assim numa possível redução da massa nas suas partes móveis, implicando assim, que os manipuladores paralelos apresentam características dinâmicas melhores em relação aos manipuladores seriais.

Em relação ao volume de trabalho dos manipuladores paralelos é muito menor em relação a um manipulador serial. Em compensação a estrutura mecânica de um manipulador paralelo é mais simples.

Para o controle de posição, a cinemática de um manipulador é um aspecto importante a ser considerado, onde a partir da cinemática direta, a posição e orientação do efetuador final são determinadas em função das variáveis articulares. O modelo cinemático inverso é necessário para o cálculo dos deslocamentos das juntas, quando são considerados os movimentos no espaço de trabalho, como por exemplo, o movimento do efetuador final ao longo de uma trajetória.

Um sensor de força pode ser utilizado a partir do conhecimento das forças e torques obtidos através do modelo estático direto. No controle de força no espaço de trabalho, o modelo estático inverso é requerido no cálculo dos torques e forças nos atuadores correspondentes aos momentos e forças no efetuador final. Os cálculos são muito mais simples, quando realizados de forma direta, sem necessidade de achar a matriz inversa. Assim, o controle no espaço de trabalho é mais fácil de ser realizado para os manipuladores paralelos, enquanto a localização do efetuador final é mais simples nos manipuladores seriais. Assim, o controle de força no espaço de trabalho nos manipuladores seriais é mais fácil de ser implementado que nos manipuladores paralelos.

Os erros de posicionamento nas articulações são acumulativos nos manipuladores seriais, enquanto que nos manipuladores paralelos, estes erros são a média de todos os erros. A capacidade de carga máxima nos manipuladores seriais é limitada para cada atuador que tem o

torque de saída mínimo nos manipuladores seriais, enquanto que nos manipuladores paralelos a capacidade de carga é a soma das forças de todos os atuadores constituintes do manipulador.

A diferença dos manipuladores seriais, o manipulador paralelo tem articulações passivas, as quais não estão associadas a um atuador, nos manipuladores seriais uma junta sempre está associada a um atuador.

A tabela 1 apresenta uma comparação qualitativa das características mecânicas e modelagem dos manipuladores com arquitetura serial e paralela, onde podemos observar as principais diferenças entre essas duas arquiteturas, e as principais vantagens e desvantagens na utilização das mesmas. (Arai; Sheridan, 1988).

Tabela 1: Comparação entre Manipuladores Serial e MPS

NIVEL	CARACTERÍSTICAS	MANIPULADOR SERIAL	MANIPULADOR PARALELO
MECANISMO	Inércia	Grande	Pequena*
	Volume de trabalho	Grande*	Pequeno
	Aparência	Antropomórfica	Base Estrutural
	Fabricação	Difícil	Fácil*
CONTROLE	Controle de posição no espaço de trabalho	Difícil	Fácil*
	Controle de força no espaço de trabalho	Fácil*	Difícil
	Deteção de Forças	Difícil	Fácil*
	Erro de Posição	Acumulado	Média *
	Erro de controle de Forças	Media*	Acumulado
	Perto de pontos singulares	Degeneração no controle de força	Diminuição de exatidão no posicionamento
		Grande movimento no atuador	Grande força no atuador
Dinâmica	Complicada*	Muito mais complicada	

A partir das considerações apresentadas anteriormente, pode-se concluir que a utilização dos manipuladores seriais apresenta vantagens na realização de tarefas que requerem

movimentos complexos e controle exato de força, como por exemplo: montagem de pequenos objetos com precisão. Por outro lado os manipuladores paralelos podem ser aplicados para manipular objetos pesados em movimentos rápidos sem um grande range de orientação.

2.2 Manipuladores Paralelos

Um robô paralelo é constituído de um efetuador com n graus de liberdade e de uma base fixa, interligados por, no mínimo, duas cadeias cinemáticas independentes. A atuação é realizada através de n atuadores simples.

Um manipulador paralelo generalizado é um mecanismo de cadeia cinemática fechada cujo efetuador está ligado à base através de várias cadeias cinemáticas independentes, podendo incluir mecanismos redundantes com mais atuadores que o número de graus de liberdade controlados do efetuador bem como manipuladores trabalhando em cooperação. Segundo Merlet, as principais características destes manipuladores são as seguintes:

No mínimo duas cadeias suportam o efetuador. Cada uma destas cadeias contém, no mínimo, um atuador simples. Há um sensor apropriado para medir o valor das variáveis associadas com a atuação (ângulo de rotação ou movimento linear). O número de atuadores é o mesmo que o número de graus de liberdade do efetuador. Um mínimo de duas cadeias permite uma melhor distribuição da carga sobre as cadeias.

A literatura corrente traz uma série de arquiteturas mecânicas para robôs paralelos. Merlet as relacionou em robôs planares (manipuladores de 2 e 3 graus de liberdade) e robôs de movimento espacial. Nesta revisão são abordados os manipuladores paralelos espaciais.

2.2.1 Manipuladores de 3 Graus de Liberdade

Manipuladores com três graus de liberdade em translação têm sido desenvolvidos para aplicações de manipulação. O mais conhecido robô deste tipo é o Delta, inicialmente desenvolvido por Clavel da *École Polytechnique Federale* de Lausanne em 1988, e atualmente

comercializado pela *Demaurex*: Divisão de Tecnologia de Embalagens do Grupo Bosch, e pela ABB (*FlexPicker*). As aplicações para este tipo de robô estão concentradas na área de embalagem, manipulação de alimentos, indústria farmacêutica, médica e eletrônica, conforme mostra a figura 5.



(a) Demaurex (máquinas de embalagem)



(b) Delta (ABB FlexPicker-IRB340)

Figura 5: Manipuladores com 3 Graus de Liberdade – translação

Outro manipulador com três graus de liberdade é o *orthoglide* (figura 6), que possui três atuadores lineares fixos montados ortogonalmente constituindo em três pernas idênticas e uma plataforma móvel que se movimenta no espaço cartesiano com uma orientação fixa (Pashkevich et al., 2006).



Figura 6: Manipuladores com 3 Graus de Liberdade – orthoglide (Pashkevich et al., 2006).

Manipuladores para orientação, ou seja, que permitem 3 rotações sobre um ponto, representa uma alternativa para o pulso com três juntas revolutas tendo eixos convergentes normalmente usados para robôs seriais. O mais simples gerador de movimentos rotativos sobre um ponto é constituído de um mastro central ligado à base e possuindo em sua extremidade uma junta bola-e-encaixe sobre a qual a base móvel é articulada. Um gerador de movimentos baseados em cadeias esféricas descrito por Asada foi desenvolvido por Gosselin e equipe na Universidade Laval, no Canadá, e chamado *The Agile Eye* para uma rápida orientação de câmeras (figura 7).

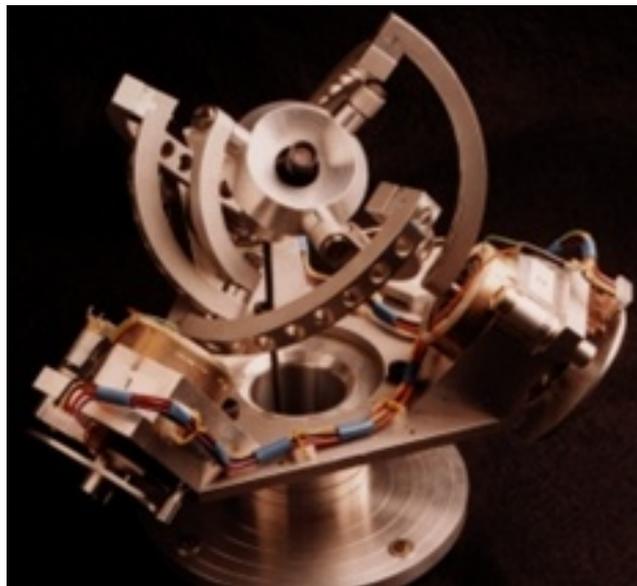


Figura 7: Manipuladores com 3 Graus de Liberdade – rotação (GOSSELIN et al. 1999)

2.2.2 Manipuladores de 4 Graus de Liberdade

Mecanismos com quatro graus de liberdade são encontrado há muito tempo na literatura. Em 1975, *Koevermans* apresentou um simulador de vôo usando atuadores lineares e com a plataforma móvel submetida a restrições passivas, onde os graus de liberdade eram três rotações e uma translação sobre o eixo Z (**W.P. Koevermans et al., 1975**).

Uma aplicação para esse mecanismo é o manipulador **The Adept Quattro™ s650 (Adept Technology)**, sendo projetado para ser utilizado em operações Pick-and-place, tais como

operações de manufatura, manipulação de materiais e montagem a alta velocidade. O manipulador *Quadruperon*, criado pelo Dr. François Pierrot e sua equipe (Nabat et al., 2006), foi inspirado no *orthoglide*, tem três graus de liberdade translacionais x - y - z e um de rotação no eixo z (figura 8).



(a) The Adept Quattro™ s650



(b) Quadruperon (orthoglide)

Figura 8: Manipuladores com 4 Graus de Liberdade – 3 translações e 1 rotação.

2.2.3 Manipuladores de 5 Graus de Liberdade

O mecanismo implementado por Austad, representa uma arquitetura híbrida para um manipulador de cinco graus de liberdade que poderia ser interpretado como uma mistura entre um robô serial e um robô paralelo onde, um primeiro dispositivo paralelo controla a posição de um ponto específico e do efetuador, e um segundo mecanismo paralelo garante duas rotações da plataforma móvel.

Outro mecanismo que podemos destacar é o de Zamanov, que desenvolveu uma arquitetura baseada no acoplamento de dois robôs paralelos planares. Esta estrutura permite o controle dos graus de liberdade da plataforma com exceção de rotação à normal à plataforma.

Este último grau de liberdade pode ser controlado através de um atuador colocado sobre a plataforma. A figura 9 exemplifica estes dois mecanismos paralelos.

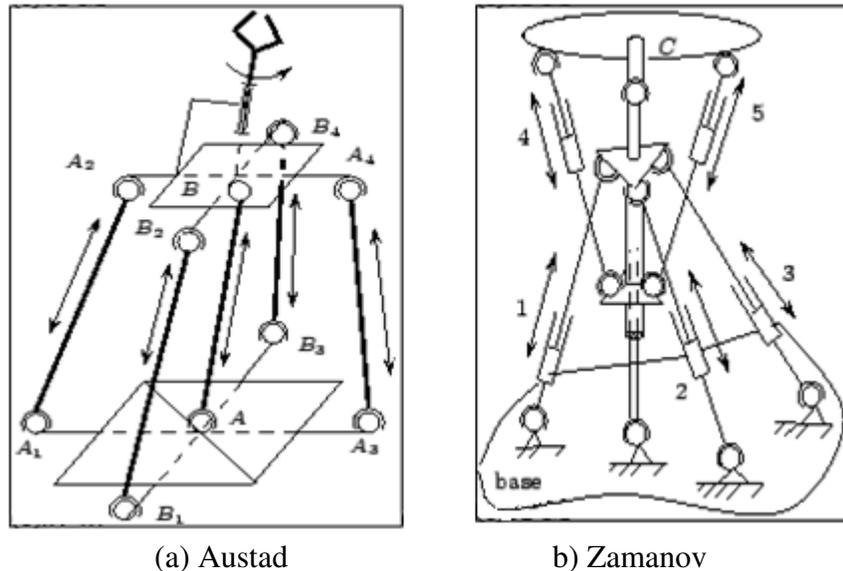


Figura 9: Manipuladores com 5 Graus de Liberdade

2.2.4 Manipuladores de 6 Graus de Liberdade

O manipulador HEXA consiste de seis cadeias cinemáticas muito leves. Todas estas cadeias são idênticas e constituídas de um braço, uma barra e de uma articulação esférica. O manipulador HEXA é fixado no teto, onde os seis motores são fixos na base, e em cada um deles associado diretamente braço. Todas estas seis cadeias cinemáticas terminam no efetuador final da plataforma móvel. O HEXA possui a capacidade de operação em altas velocidades, com baixas cargas na plataforma móvel. Este manipulador foi desenvolvido pela *Toyota Machine Works* (PIERROT ET AL., 1990).

Um Manipulador Plataforma de Stewart (MPS) é constituído por uma base fixa unida a uma base móvel por seis atuadores lineares, a distribuição espacial dos atuadores no MPS forma

um octaedro (STEWART, 1965). O mecanismo desenvolvido. O MPS opera com baixas velocidades, altas cargas na plataforma móvel e tem uma rigidez alta (figura 10).



(a) HEXA



(b) Manipulador Plataforma Stewart

Figura 10: Manipuladores paralelos de seis graus de liberdade

2.2.5 Exemplos de aplicação dos manipuladores paralelos

Manipuladores paralelos têm sido freqüentemente utilizados nos últimos anos em diferentes aplicações no campo da engenharia, proporcionando soluções de posicionamento na indústria, utilização em diferentes aplicações em medicina e em variadas aplicações especiais, descritas a seguir.

➤ Aplicações Espaciais

O robô CKCM estudado pela NASA (*Goddard Space Flight Center*) por *Nguyen* e sua equipe (NGUYEN et al., 1991).

Um robô hexápode também foi desenvolvido pelo Instituto Max Planck para ser usado com o telescópio UKIRT (*United Kingdom Infra-Red Telescope*) para movimentos lentos de foco. A companhia alemã Vertex também oferece uma estrutura paralela para uso com telescópios (Yang et al., 2002).

➤ Aplicações Médicas

Nesta área podemos destacar um endoscópio com dispositivo de fixação ativo usando um robô com 3 graus de liberdade atuados por fios que foi construído por Wendlant (**WENDLANDT; SASTRY, 1994**). Outra aplicação médica para a estrutura paralela é o uso na assistência de pessoas deficientes para a movimentação de seus braços, como sugerido por Homma (**ARAI et al., 1990**). Estas estruturas também são utilizadas como suporte para microscópio e auxílio em cirurgias de precisão. A figura 11 apresenta algumas aplicações médicas utilizando manipuladores paralelos.

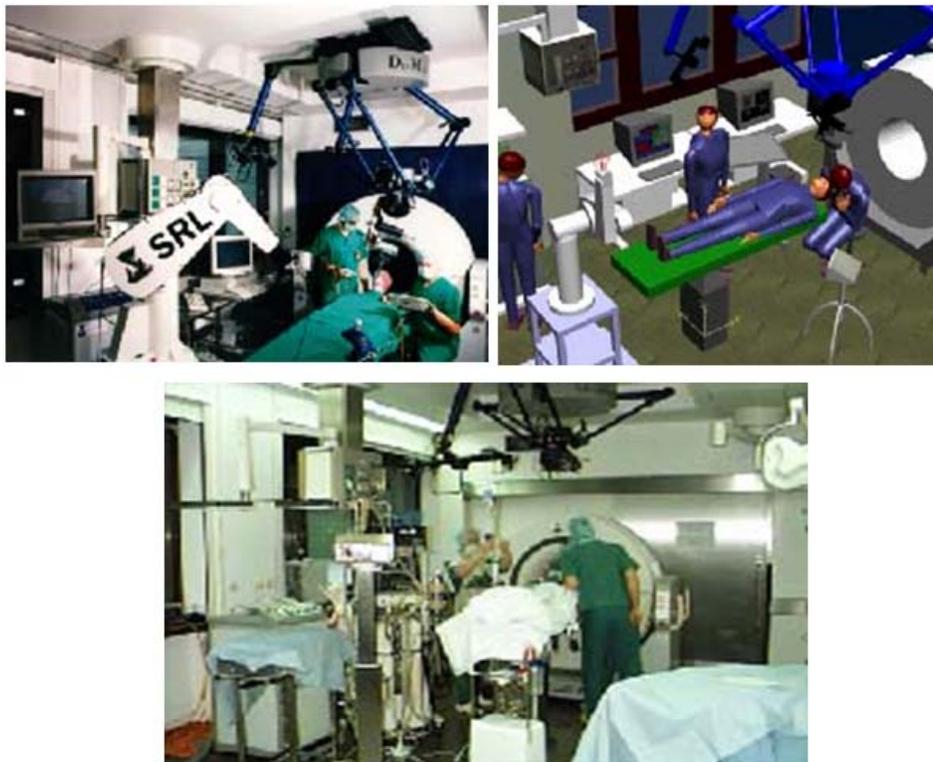


Figura 11: Manipuladores Paralelos - Aplicações Médicas

➤ Aplicações Industriais

Atualmente, manipuladores paralelos são muito utilizados industrialmente devido às suas características de alta precisão de posicionamento e enorme rigidez. As principais aplicações destes manipuladores são em operações de montagem e desmontagem, manipulação de peças, soldagem a ponto e aplicações usando realimentação de força.

O modelo Delta representa o melhor exemplo de um manipulador de estrutura paralela usada industrialmente em tarefas de manipulação rápida de objetos. Nos dispositivos máquina-ferramenta de precisão um dispositivo paralelo do tipo plataforma de Stewart-Gough pode ser utilizado para posicionamento de peças mecânicas complexas durante a execução de operações de fresagem e usinagem em 3 e 5 eixos. A figura 12 apresenta algumas aplicações industriais utilizando esses manipuladores.

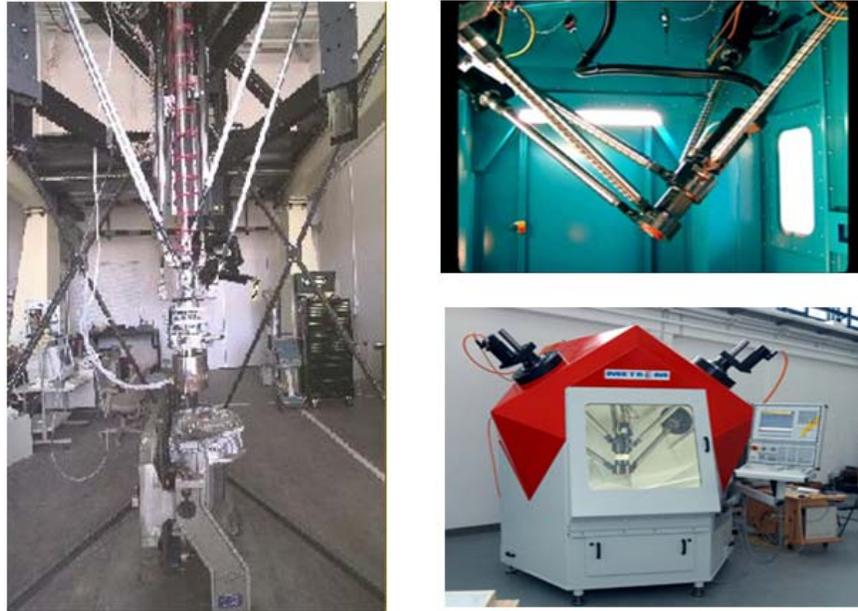


Figura 12: Manipuladores Paralelos - Aplicações Industriais.

2.3 Simuladores Robóticos

A realização de etapas de modelagem, simulação e análise é o processo de criar e experimentar com modelos computadorizados matemáticos de sistemas físicos, neste caso manipuladores robóticos.

A simulação de manipuladores robóticos pode ser classificada em dois níveis: simulação gráfica e simulação numérica. A simulação gráfica de manipuladores abrange a visualização de da movimentação do manipulador no seu ambiente de trabalho, sendo a mesma baseada CAD e na utilização de ferramentas de visualização gráfica. Ao mesmo tempo, a simulação de

manipuladores utiliza conceitos de simulação numérica da dinâmica e o controle do manipulador.

O primeiro nível de simulação concerne basicamente a modelagem cinemática, ignorando numa primeira análise, aspectos relacionados à dinâmica e controle de um manipulador. Assim, o usuário especifica a trajetória a ser seguida pelo manipulador robótico e a partir da simulação podemos visualizar o movimento cartesiano do manipulador a partir do movimento resultante no espaço das juntas.

A simulação de movimentos a partir da cinemática permite a implementação do projeto de um manipulador robótico e sua integração no ambiente de trabalho. Conseqüentemente a habilidade de visualizar o movimento de um manipulador permite a obtenção por parte do usuário de respostas rápidas ao planejamento de trajetórias, análise completa de restrições do volume de trabalho e detecção de colisões.

Em muitas situações, é suficiente a não utilização da dinâmica do manipulador na simulação de movimentos do mesmo, sendo isto perfeitamente válido quando são utilizados manipuladores comerciais que durante a fase de concepção e projeto foram desenvolvidos obedecendo as especificações técnicas do fabricante, que atendessem aspectos relacionados a dinâmica (cargas, esforços, acelerações, velocidades), necessitando o utilizador final somente de um simulador cinemático.

As principais motivações para incluirmos a dinâmica na simulação é ajudar no projeto mecânico e implementação do sistema de controle do manipulador destinado a aplicações especiais. Quando este é o caso, existem ferramentas para simulação numérica baseadas nos princípios físicos que possibilitem a predição do comportamento dinâmico do manipulador robótico.

Uma boa ferramenta para simulação numérica da dinâmica de um manipulador, não somente pode ajudar no projeto mecânico e do sistema de controle, como também pode ajudar a estabelecer a potencia requerida para os atuadores, a seleção dos sensores mais adequados para a aplicação, e a medida do rendimento como resolução, precisão, velocidade e largura de banda máxima. Mesmo assim, sempre é conveniente incluir na simulação, a animação dos movimentos,

considerando que nem sempre é fácil compreender os resultados de uma simulação somente através de resultados numéricos.

A modelagem, simulação e análise dos manipuladores robóticos é realizada para os seguintes propósitos:

- *Compreensão do princípio de operação de um manipulador:* O comportamento de alguns manipuladores pode ser complexo, por exemplo: nos manipuladores paralelos; não é intuitivo entender a operação de um manipulador e sua interação com o modelo dinâmico.
- *Melhorar o desempenho e desenvolvimento das operações dos Manipuladores:* A melhoria de desempenho para os manipuladores existentes, necessita de um planejamento das operações a serem realizadas pelo mesmo.
- *Comprovar novos conceitos ou sistemas antes de uma implementação:* A simulação pode ser utilizada como ferramenta de ajuda e proposta de novas idéias no processo de escolha ou implementação de um manipulador. Mediante a simulação podem ser implementadas novas leis de controle para o manipulador.

2.3.1 Simulação Gráfica baseada na cinemática

Uma simulação gráfica consiste de uma interface gráfica de visualização que a partir da entrada de parâmetros conhecidos podemos visualizar um movimento desejado no manipulador dentro de um ambiente gráfico. Isto pode ser realizado na forma de um arquivo texto, um movimento de um *mouse*, teclas de deslizamento ou quadros de dialogo, ou qualquer forma básica de entrada de uma determinada aplicação. As rotinas da cinemática transformam o movimento desejado do manipulador nas transformações requeridas para o movimento de cada componente do manipulador.

O resultado dessas transformações é utilizado através da implementação de funções gráficas que permitem a rotação ou translação de cada componente básico de um manipulador para prover a animação coordenada de um determinado movimento.

2.3.2 Simulação Numérica baseada na dinâmica

Na simulação numérica são considerados os efeitos dinâmicos dos diferentes componentes de um manipulador, tais como dinâmica dos atuadores e mecanismos entre outros. A metodologia para a simulação numérica requer do uso de um software simbólico e de um conhecimento profundo da dinâmica de um manipulador. A aproximação é baseada no uso de transformações homogêneas que descrevem os pontos representativos no manipulador: juntas e seus respectivos centros de massa. Usando transformações matemáticas são construídas as velocidades angulares e lineares em relação a cada centro de massa.

A modelagem matemática para a simulação numérica de um manipulador pode ter dois enfoques: simulação da dinâmica inversa e da dinâmica direta. Na simulação da dinâmica inversa são determinados as forças e torques nas juntas a partir de uma trajetória cartesiana que define o movimento do manipulador, e mediante esta análise podem ser encontradas as forças e torques em função da posição do manipulador. Na simulação da dinâmica direta é determinada a posição, velocidade e aceleração nas juntas a partir da aplicação dos torques ou forças.

Para simular a dinâmica de um manipulador, inicialmente é estabelecida a equação dinâmica do manipulador. Dentre as varias abordagens que poderão ser utilizadas para determinar a equação dinâmica podemos destacar: Newton-Euler e Euler-Lagrange como as mais utilizadas. A simulação da equação dinâmica do manipulador é realizada utilizando pacotes de simulação que permitem a solução da equação dinâmica a partir de integração numérica.

Para exemplificarmos aspectos apresentados anteriormente, apresentaremos a seguir, algumas aplicações de simuladores para manipuladores seriais e paralelos.

2.3.3 Verificação e Validação em Simuladores Robóticos

A implementação de simuladores de manipuladores robóticos deve atender dois conceitos associados à comprovação da simulação e a correlação da simulação do modelo a ser simulado a partir de protótipos reais.

O principal objetivo de estabelecer esta comprovação é demonstrar a validade da simulação efetuada. Neste tópico são apresentados alguns conceitos necessários para verificação e validação de um Simulador Robótico (CHUNG, 2004).

- *A verificação* de uma simulação de um manipulador robótico corresponde a comprovação que o modelo possua todos os componentes necessários para que a simulação possa ser realizada. A verificação do modelo comprova que a construção do modelo seja realizada corretamente. Nos simuladores robóticos a verificação esta associada à simulação cinemática, sendo a mesma realizada através da comparação gráfica do modelo geométrico do manipulador e a trajetória executada.
- *A validação* da simulação de um manipulador robótico corresponde a comprovar que o modelo simulado represente a realidade. A validação do simulador está associada à simulação dinâmica do manipulador robótico, e pode ser verificada através de dois modos:
 - *Estatística*: consiste numa comparação quantitativa entre a representação da saída do sistema atual e de seu modelo associado.
 - *Superficial (Face validation)*: realizada por especialistas com alto grau de conhecimento do manipulador a ser simulado, consiste na comprovação mínima e superficial, se o modelo implementado corresponde à realidade física, a partir das propriedades do modelo (congruência de resultados), reduzindo assim possíveis dúvidas teóricas no modelo mediante a apresentação de fundamentos matemáticos associados ao modelo.

Considerando o perfeito conhecimento físico do sistema em estudo, no presente trabalho será aplicado o conceito de Validação Superficial (*face validation*) do modelo.

2.3.4 Simuladores para Manipuladores Paralelos

Conforme foi mencionado anteriormente, existe um grande número de trabalhos na literatura enfocando simuladores para os manipuladores seriais, entretanto para simuladores

dedicados a manipuladores paralelos existem muitos poucos trabalhos na área de simulação (**Wang et al., 2002**).

Ao contrario dos manipuladores seriais, o projeto de manipuladores paralelos são mais abertos, com grande diversidade de possibilidades de configurações implicando assim na necessidade de diferentes considerações que envolvem um vasto conhecimento espacial, mas que permitem a obtenção de equações matemáticas com grande simplicidade. Isto justifica a necessidade do desenvolvimento de simuladores que encapsulem o modelo cinemático e dinâmico que permitam interatuar com o modelo avaliando o desempenho do manipulador em função dos parâmetros de projeto do mesmo.

Gosselin et al. (1999) apresentam um simulador cinemático e modelo geométrico em CAD de um manipulador paralelo esférico com três graus de liberdade. Neste simulador é resolvido o problema cinemático direto e inverso e toda a análise de singularidades do manipulador. Este simulador permite uma análise interativa de um manipulador esférico com três graus de liberdade com arquitetura arbitrária.

Este simulador inclui a representação do espaço de trabalho e análise de singularidades, permitindo também a animação gráfica das trajetórias especificadas pelo usuário. O objetivo principal dos autores foi à implementação de um simulador como ferramenta de projeto para um manipulador esférico com três graus de liberdade, permitindo a análise e melhoria de desempenho do mesmo a partir de um protótipo virtual. Etapas relacionadas a simulação, análise da dinâmica e controle deste tipo de manipulador não foram desenvolvidas neste trabalho.

Bingul et al. (2002) propõem um pacote de simulação gráfica a partir de ROBOSIM, permitindo a operação e interface com outros programas. Este simulador tem um interpretador baseado na linguagem LISP que permite ao usuário modelar o manipulador, enquanto os resultados são mostrados em gráficos 3-D.

Este simulador possui características importante tais como: detector de colisões, cinemática inversa, operações de transformação de matrizes e varias interfaces gráficas, podendo ainda ser modelizados manipuladores com cadeias cinemáticas abertas ou fechadas. Neste simulador não está incluído, a análise dinâmica e nem o projeto do sistema de controle do

manipulador, entretanto os autores sugerem para este propósito utilizar o software MATLAB-SIMULINK®.

Sapio (1998) propõe como trabalho futuro o desenvolvimento de um *toolbox e MATLAB* para análise de manipuladores paralelos (figura 13), utilizando os mesmos procedimentos desenvolvidos anteriormente para manipuladores seriais por **Corke (1996)**.

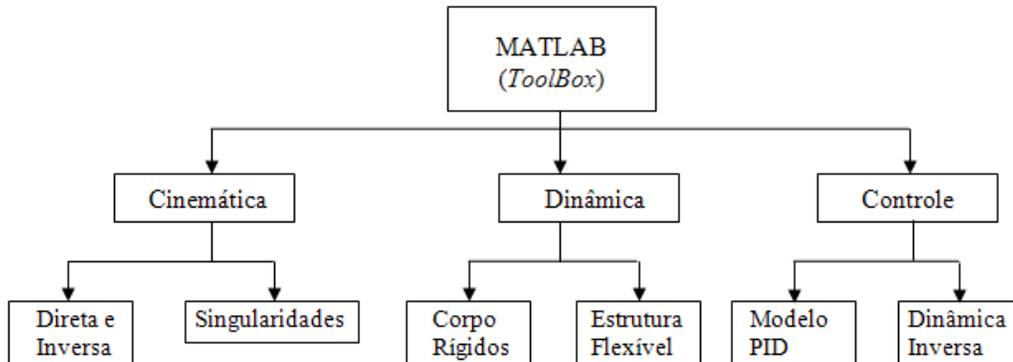


Figura 13: Toolbox para Manipuladores Paralelos proposto por (SAPIO, 1998)

Li et al. (2002) ressaltam a importância da modelagem da rigidez em máquinas com mecanismos paralelos para avaliar estes parâmetros durante o projeto de um manipulador. A deformação estrutural das máquinas paralelas pode implicar em erros significativos de posicionamento. Neste trabalho foi usado um modelo baseado no Método de Elementos Finitos - Finite Element Analysis (FEA) para simular a estrutura física. A modelagem da rigidez pode ser usada como uma ferramenta para predição da rigidez no volume de trabalho.

2.4 Simuladores e ferramentas de projeto para Plataforma de Stewart

Dando continuidade ao trabalho de revisão bibliográfica discutido no tópico precedente, serão discutidos alguns trabalhos desenvolvidos para a modelagem e simulação do Manipulador Plataforma de Stewart (MPS).

2.4.1 Ferramentas para concepção e projeto

O pacote de simulação **20SIM** permite criar modelos mecânicos de sistemas multi-corpos em 3D, onde a construção do modelo é intuitiva, através da inserção dos corpos rígidos e as

respectivas articulações do manipulador em estudo. Neste modelo podem ser incluídos atuadores, sensores e controladores permitindo assim a criação de um modelo completo de uma Plataforma de Stewart. A partir deste programa o comportamento do modelo poderá ser calculado e visualizado através da animação gráfica do sistema.

Assim, uma plataforma de Stewart poderá ser simulada através deste programa, onde o modelo da plataforma: links, articulações, motores e sensores são inclusos no pacote de simulação. A cinemática inversa e as trajetórias de referencias são resolvidas durante a simulação, e para o controle de posição no espaço das juntas são utilizados controladores PID. A figura 14 apresenta esta aplicação através da utilização do software 20SIM. Nesta simulação não é analisado o volume de trabalho e singularidades do manipulador, e estratégia de controle é realizada para cada junta individualmente (espaço de juntas), não sendo realizada uma malha de controle no espaço cartesiano.

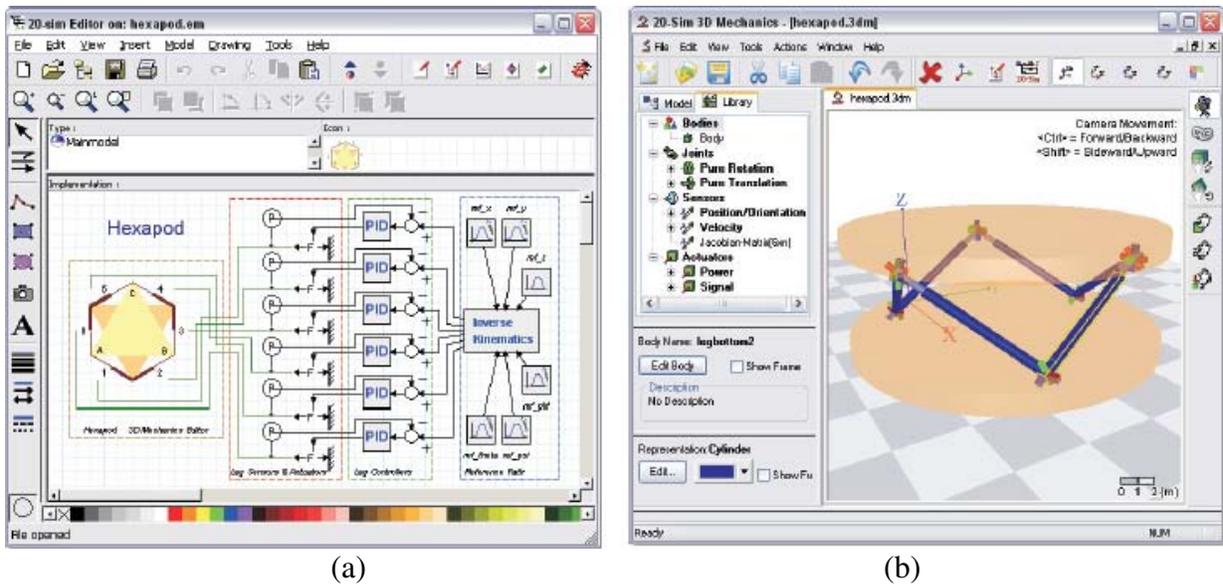


Figura 14: Simulação de uma plataforma de Stewart através do 20SIM.

SIMULATION SOFTWARE ENGINEERING desenvolveu o pacote de simulação ITI SimulationX para sistemas mecânicos, que é uma ferramenta CAE universal para modelagem, simulação e análise de efeitos físicos tais como: análise de mecanismos 1D e 3D, transmissões de potência, sistema de acionamento elétrico, hidráulico ou pneumático, análise térmica, sistemas eletrônicos, efeitos magnéticos e projeto de controladores.

Através desta simulação é projetado o sistema de controle de posição para o mecanismo 3D da Plataforma de Stewart, baseado num controlador clássico do tipo PID. Durante a simulação é observado o comportamento do modelo em termos de resultados quantitativos: velocidades, acelerações, forças e torques, e também através de visualização animada 3D. O usuário pode interatuar com o modelo com possibilidade de alterar os parâmetros para observar as mudanças de comportamento na resposta do sistema. A figura 15 apresenta um exemplo de implementação desta aplicação.

Nesta aplicação podem-se verificar grandes limitações durante a simulação da Plataforma de Stewart através de programas para Prototipagem Rápida (Virtual Prototyping). Aspectos fundamentais no projeto tais como: volume de trabalho, singularidades, planejamento de trajetórias não são considerados nesta simulação.

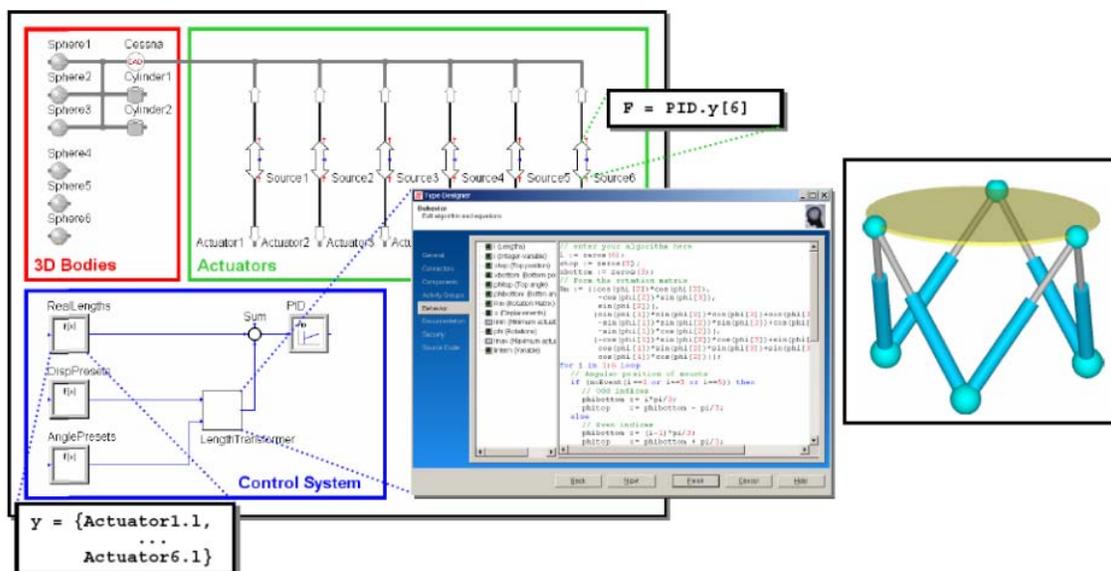


Figura 15: Simulação de uma plataforma de Stewart através do Software ITI SimulationX

The MathWorks, Inc. desenvolveu um exemplo de aplicação para simular a Plataforma de Stewart. As ferramentas de CAD permitem a modelagem geométrica das máquinas e a detecção de colisão de um conjunto de partes ou conjunto montado. Diagramas de blocos implementados em Simulink® e SimMechanics™ são utilizados para modelagem e simulação da dinâmica de sistemas mecânicos e sistemas de controle.

A figura 16 esquematiza as diferentes etapas do processo, onde podemos verificar que a integração de um modelo implementado em CAD para SimMechanics™ são combinadas as vantagens na utilização dos dois aplicativos.

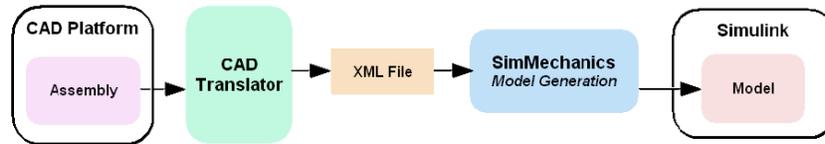
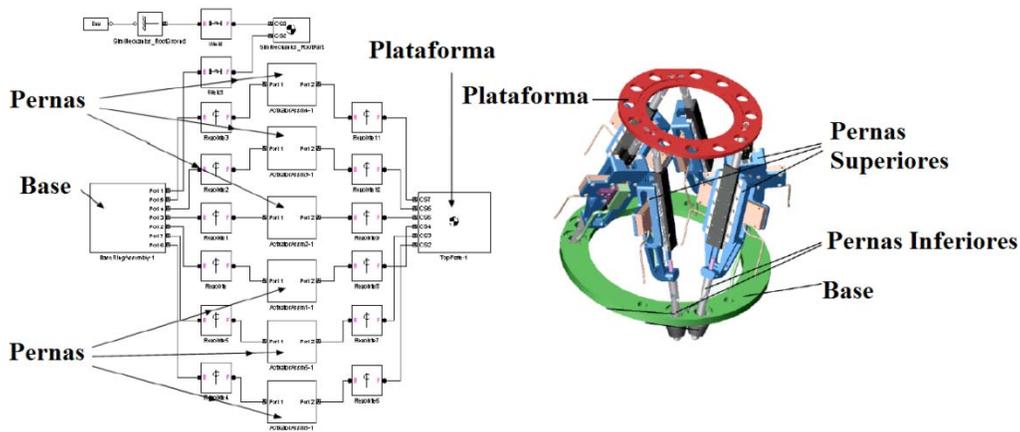


Figura 16: Transformação do modelo CAD a SimMechanics™ (Mathworks, Inc.)

O diagrama de blocos em SimMechanics™ corresponde a topologia original (articulações e corpo rígidos) do mecanismo. A possibilidade de interfaceamento entre o modelo implementado em CAD e o modelo em SimMechanics™ é um arquivo XML, através da implementação em diagrama de blocos em SimMechanics™ não inclui a informação total da geometria mas contém informações necessárias para efetuar a simulação dinâmica. A figura 17 apresenta os diagramas de blocos e visualização espacial correspondente a implementação de uma Plataforma de Stewart em SimMechanics™.



(a) Diagrama de Blocos em SimMechanics™ (b) Plataforma de Stewart

Figura 17: Simulação de uma plataforma de Stewart através do Mathworks.

As ferramentas apresentadas anteriormente são aplicadas para a modelagem e simulação de uma Plataforma de Stewart. É importante destacarmos a importância de um conhecimento teórico do problema por parte dos usuários dessas ferramentas, pois ao ser aplicada a transformação através do modelo geométrico CAD ao modelo físico XML (figura 16), poderão

ocorrer algumas inconsistências na conversão em função dos parâmetros, que implicarão em prováveis erros de simulação. Ainda que seja proposta a simulação dinâmica da plataforma de Stewart usando uma metodologia genérica para qualquer mecanismo, nesta simulação são desprezados aspectos essenciais do projeto de um MPS tais como análise da cinemática e planejamento de trajetórias.

2.4.2 Simuladores da modelagem cinemática

Falco desenvolveu um banco de provas para demonstrar como as máquinas, softwares e pessoas pudessem estarem integrados em rede para trabalhar de modo efetivo e eficiente. O Banco de provas permite melhorar a produtividade e implementar inovações em todos os níveis da manufatura, onde para atender esses objetivos foi desenvolvida a caracterização, acesso remoto e simulação para máquinas baseadas na Plataforma de Stewart (figura 18).

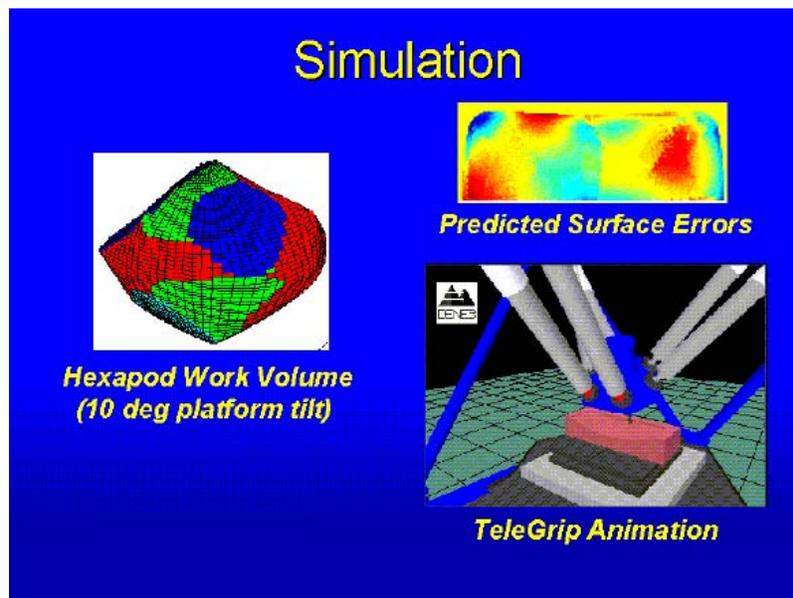


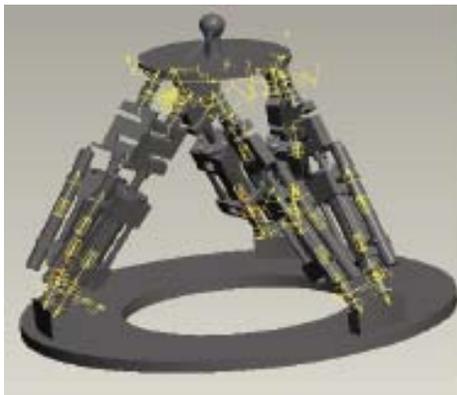
Figura 18: Simulação da cinemática, FALCO

O objetivo desse estudo foi a implementação de um simulador para ajudar na compreensão que as máquinas baseadas na Plataforma de Stewart podem fazer para serem melhor utilizadas pelos operários de uma fábrica contendo estes dispositivos. São utilizadas

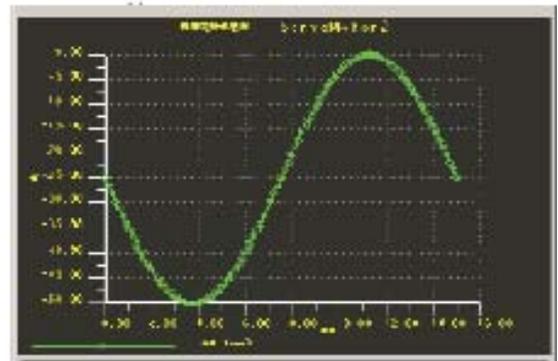
ferramentas de modelagem e simulação construídas em IGRIP, enquanto os modelos geométricos utilizados são importados do aplicativo Pro-Engineer (Pro-E).

Finalmente, o banco de provas implementado permitiu ao operário se familiarizar com operação de máquinas baseadas numa Plataforma de Stewart e planejar as tarefas a serem realizadas através de interface gráfica. É importante destacar que este banco de provas constitui uma ferramenta para a análise da Plataforma, entretanto a mesma não é adequada para o projeto de novos protótipos.

Zhang e Chen (2007) utilizaram o software Pro-E para modelagem de uma Plataforma de Stewart, evitando assim cálculos complexos das dimensões e verificação analítica de colisões de peças para um determinado movimento. Durante a simulação é medida a posição de cada uma das partes, realizando um estudo da interação entre esses componentes. O objetivo desta simulação é melhorar a estrutura do manipulador a partir da simulação de movimentos padrão.



(a) Pares cinemáticos



(b) Curva de movimento para um Atuador linear

Figura 19: Simulação de uma plataforma de Stewart através do ZHANG, CHEN, 2007.

Neste simulador não é considerado a dinâmica e sua estrutura de controle, restringindo-se somente à validação dos movimentos do manipulador e a verificação se os mesmos encontram-se dentro do espaço operacional do manipulador, e a partir de um modelo 3D para trajetórias arbitrárias, são verificados a possibilidade de colisões entre as peças. Nesta simulação não são caracterizadas as medições dos parâmetros cinemáticos da Plataforma de Stewart. A figura 19

apresenta um exemplo de implementação da simulação e os resultados utilizando o modelo de Zhang e Chen (2007).

Rosario et al. (2007) apresentam uma implementação prática de uma Plataforma de Stewart, baseada em cálculos reconfiguráveis através de estudo preliminar de um ambiente robótico virtual para a modelagem e simulação de sistemas mecatrônicos, contemplando aspectos relacionados à modelagem dinâmica e controle. Nesta simulação é desenvolvida a modelagem cinemática, dinâmica e o projeto de um controlador de posição para cada atuador.

O hardware e o software constituem dois blocos independentes, onde para o software foi implementado um algoritmo para a análise do modelo cinemático, e para o hardware foi projetado um controlador PID na forma RST para cada um dos graus de liberdade da Plataforma de Stewart utilizando circuitos lógicos reprogramável (FPGA). A figura 20, é apresentada uma tela do ambiente virtual implementado, onde podemos verificar alguns resultados da simulação proposta, considerando os movimentos pré-definidos anteriormente pelo utilizador.

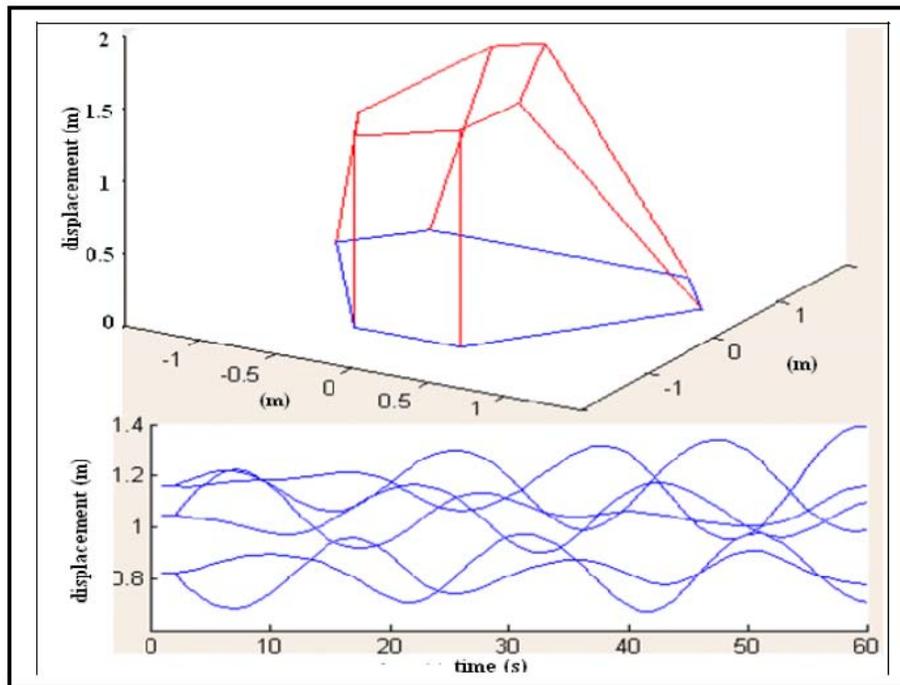


Figura 20: Simulador de Movimentos de plataforma de Stewart (ROSARIO et al., 2007).

Sapio (1998) faz uma revisão técnica direcionada a algumas aproximações analíticas para modelagem e resolução do problema cinemático da Plataforma de Stewart, a partir de cálculos

envolvendo a cinemática inversa e direta, jacobiano, execução de trajetórias, rigidez estrutural, volume de trabalho e caracterização da velocidade na ferramenta.

Para resolução do problema de modelagem da Plataforma de Stewart foram desenvolvidos programas dedicados em MATLAB. Neste programa foram implementadas rotinas para o modelo cinemático inverso, cálculo do volume de trabalho considerando os limites físicos das articulações. Essas rotinas permitem também uma análise completa da velocidade de trabalho na ferramenta e cálculo da rigidez utilizando o princípio de trabalho virtual.

Advani et al. (2002) analisaram a modelagem cinemática da Plataforma de Stewart para o projeto do mecanismo para um sistema de movimentação vertical (VMS), que consistia de um dispositivo para a simulação de voo de múltiplas aeronaves na NASA e Ames Research Center. Neste trabalho foi desenvolvido um simulador do modelo cinemático da Plataforma de Stewart que permitia a obtenção da configuração geométrica ótima e conseqüentemente, a obtenção dos parâmetros de projeto especificados pelo projeto do VMS.

2.4.3 Simulação da Dinâmica da Plataforma de Stewart

Dasgupta e Mruthyunjaya (1998) apresentaram algoritmo que permitia a simulação das forças envolvidas para acionamento dos atuadores da Plataforma de Stewart. A formulação da dinâmica inversa desta plataforma foi desenvolvida mediante a aproximação Newton-Euler. Como os termos redundantes são simplificados nessa formulação, este algoritmo se mostrou apropriado para a formulação dinâmica e para aplicações de controle on-line.

O algoritmo proposto para formulação das equações dinâmicas foi implementado em MATLAB, e para realização de testes deste algoritmo foram implementadas trajetórias pré-definidas para simular os movimentos do manipulador. A simulação apresentada revela a variação da força dos atuadores na Plataforma de Stewart durante a evolução de uma determinada trajetória, justificando assim, a modelagem dinâmica para o controle.

Neste trabalho pode-se verificar a importância de realizarmos um planejamento das trajetórias para evitar as singularidades no manipulador, já que o volume de trabalho do manipulador tem regiões com singularidades, implicando num aumento das forças nos atuadores.

Liu et al. (2000) implementaram em MATLAB, rotinas baseadas na formulação da dinâmica direta de uma Plataforma de Stewart baseando-se na equação de Kane. Na simulação são fornecidas forças constantes para cada atuador e condições iniciais de posição e velocidade inicial, encontrando-se a posição, orientação e velocidade linear e angular da Plataforma. Para os atuadores são achadas as posições e velocidades lineares.

A simulação do modelo dinâmico baseada na formulação proposta pelos autores é mais compacta que os métodos tradicionais baseados na formulação de Lagrange e Newton-Euler, considerando que o processo pode ser feito automaticamente através do computador enquanto a derivação do modelo dinâmico com metodologias tradicionais é mais complicada pelas transformações entre o espaço de trabalho e o espaço das juntas.

Li et al. (2002) apresentam a simulação dinâmica de sistemas mecânicos e robóticos em cadeias cinemáticas fechadas usando como aproximação de uma mola virtual. Esta aproximação utiliza molas e amortecedores virtuais para incluir restrições cinemáticas, evitando assim a solução de equações diferenciais algébricas.

A principal vantagem desta aproximação é que consideramos o completo desacoplamento da dinâmica do modelo, sendo ideal para aplicações de simulação dinâmica em tempo real. Os autores desenvolvem simulações desta metodologia direcionadas a uma Plataforma de Stewart, e os resultados obtidos através dessa aproximação são validados a partir da comparação de resultados obtidos em outros trabalhos de modelagem dinâmica deste manipulador.

Nadimi et al. (2006) utilizam para a modelagem dinâmica da Plataforma de Stewart implementada em MATLAB V6.5. Uma das principais vantagens de utilizarmos o modelo de MATLAB implementado em SimMechanics é a possibilidade de modelagem de uma Plataforma de Stewart, sem a necessidade de derivarmos explicitamente as equações de movimento, já que é um processo muito tedioso.

Neste modelo de grande precisão, é considerada a complexidade da dinâmica entre as articulações. O esquema de implementação deste modelo implementado em SimMechanics é apresentado na figura 21.

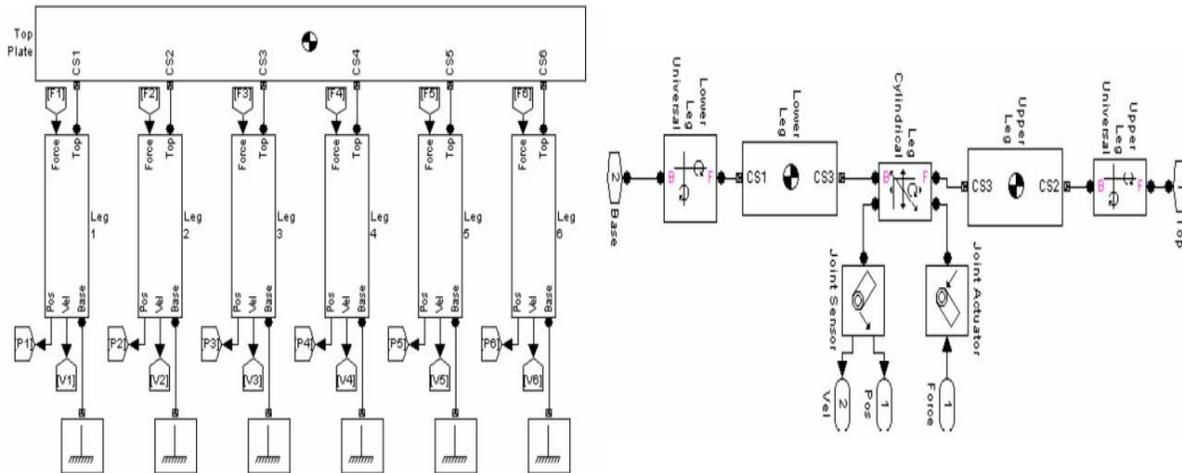


Figura 21: Representação esquemática de uma Plataforma de Stewart em SimMechanics™ (NADIMI et al., 2006)

Mediante a simulação de uma Plataforma de Stewart podemos perceber que o modelo utilizado leva em consideração todos os efeitos dinâmicos das juntas cilíndricas e universais. Desta forma o modelo é mais preciso, quando comparado com outros modelos encontrados na literatura que utilizam a formulação de Lagrange, considerando que normalmente os autores realizam uma aproximação de um sistema de segundo ordem que contém: massa, elasticidade e atrito viscoso, sem considerar a dinâmica das juntas. As aproximações de segundo ordem, obtidas através de métodos clássicos estão propensas a erros e não consideram o comportamento completo da plataforma, tais como a dinâmica das juntas, conseqüentemente o controlador acaba sendo projetado baseado num modelo que não apresenta a precisão requerida.

Guo e Li (2006) apresentam as equações dinâmicas da Plataforma de Stewart utilizando combinadamente os métodos de Newton-Euler e Lagrange-Euler. A equação da dinâmica foi expressa de forma compacta e fechada. Na modelagem foi apresentada a análise cinemática: formulação das velocidades e acelerações que são necessárias para derivar as equações dinâmicas.

As rotinas dos algoritmos das equações dinâmicas foram implementadas em MATLAB. Este modelo e simulação têm sido utilizadas para o estudo de problemas da dinâmica inversa da Plataforma de Stewart. Para validação do modelo e obtenção dos resultados desta simulação, têm sido usados os parâmetros dos trabalhos desenvolvidos por **Tsai (2000)**. Os resultados obtidos a partir da simulação correspondem às forças nos atuadores, e estes resultados são comparados aos obtidos pelos autores anteriormente citados.

Os resultados na simulação revelam a importância da consideração da inércia dos atuadores responsáveis pela movimentação da plataforma para simulação da dinâmica do manipulador e a efetividade do método proposto para as equações da dinâmica do Manipulador Plataforma de Stewart.

2.4.4 Simulação de Controladores aplicados à Plataforma de Stewart

Li e Salcudean (1997) descrevem a modelagem, simulação e controle de uma Plataforma de Stewart invertida, projetada para servir como simulador de movimentos para uma pessoa. Neste trabalho, o modelo dinâmico foi encontrado utilizando o princípio do trabalho virtual, sendo o modelo dos atuadores apresentado e obtido a partir de dados experimentais, sendo ainda proposto um controlador para o espaço das juntas com realimentação de pressão, que demonstra um bom rendimento, estabilidade e robustez.

Neste trabalho foram comparadas a resposta analítica, a simulação e a resposta do protótipo experimental da Plataforma de Stewart. Os resultados obtidos a partir da simulação da resposta do manipulador mostra a coincidência com a resposta analítica, mostrando que neste caso, a dinâmica das pernas do manipulador poderá ser ignorada.

Fasse e Gosselin (1998) estudaram o controle da impedância mecânica do Manipulador Plataforma de Stewart, sendo apresentados dois métodos de controle: o primeiro baseado na função energia potencial e o segundo utilizando um mapa exponencial associado a deslocamentos finitos desta plataforma. A partir da implementação desses algoritmos de controle, os resultados obtidos a partir da simulação apresentam os deslocamentos da plataforma como solido em 3D.

Su et al. (2004) propõem um controle no espaço de juntas sujeito a rejeição de auto-perturbações robustas simples (ADRC). A finalidade deste controlador é realizar um controle de alta precisão durante a evolução de uma trajetória (Tracking Control) nos 6 graus de liberdade da Plataforma de Stewart. Para verificar a efetividade desta proposta são realizadas simulações com apresentação de resultados experimentais.

You et. al (2004) propõem um algoritmo de controle de movimento robusto. Neste algoritmo é incluído um observador robusto para o estado e a perturbação da Plataforma de Stewart que é combinado com a estrutura variável do controlador. A partir desta simulação pode ser verificado o funcionamento e rendimento do algoritmo de controle proposto.

Para o modelo das equações dinâmicas da Plataforma Stewart foi aplicada a formulação de Lagrange e o Princípio de Trabalho Virtual, e nas equações dinâmicas são inclusos os efeitos dinâmicos do manipulador e dos atuadores.

Durante a simulação foram utilizadas como referencia: trajetórias de posição e velocidade para o manipulador, encontrando-se erros de posição inferiores a 2mm. O algoritmo de controle proposto foi testado experimentalmente, encontrando-se resultados bem próximos a simulação (2 mm de erro no posicionamento).

Remillard e Boukas (2006) desenvolveram a arquitetura de controle de uma Plataforma de Stewart usando o modelo Fuzzy Takagi e Sugeno (T-S) para efetuar a análise e o projeto da estabilização do controlador. Os resultados obtidos através da simulação mostraram a eficiência do controlador implementado.

Ghobakhloo et al. (2006) propõem a aplicação de um controlador utilizando a dinâmica inversa (tracking control) para uma Plataforma de Stewart. A equação dinâmica do manipulador é obtida através da formulação de Lagrange, sendo implementado um controlador de posição do tipo PD.

A simulação do manipulador e lei de controle proposta mostrou a eficiência do mesmo. Na simulação, é proposta uma trajetória a ser seguida pelo manipulador no volume de trabalho, e a partir da execução da trajetória são apresentados os erros de posição e orientação, a compensação exercida através do controlador e as forças aplicadas em cada um dos atuadores.

Davliakos e Papadopoulos (2007) desenvolveram um controlador de posição (Tracking Position Control) para uma Plataforma de Stewart com atuadores eletro-hidráulicos utilizada diante das altas forças e velocidades requeridas. A simulação desta plataforma foi realizada para avaliação do rendimento do controlador proposto.

A formulação dinâmica da Plataforma de Stewart foi obtida a partir da formulação de Lagrange, onde foram consideradas forças estáticas, viscosas e de Coulomb. No modelo dinâmico completo foram incorporados a dinâmica do manipulador e dos atuadores, e o controle de posição é feito usando uma realimentação de força baseado num controlador PD.

Através da simulação foi comprovado o funcionamento de um controlador para o seguimento de uma trajetória desejada, sendo apresentados para cada atuador: os sinais de controle, forças envolvidas, erro e o comprimento.

2.5 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado um trabalho de revisão de literatura aprofundada sobre simuladores de manipuladores robóticos, com ênfase nos desenvolvidos para um Manipulador Plataforma de Stewart, sendo abordados os seguintes aspectos: ferramentas de projeto, modelagem e simulação aplicadas a estes dispositivos, simulação da cinemática, das equações dinâmicas e técnicas de controle para estes manipuladores.

A partir da revisão dos simuladores desenvolvidos e nas ferramentas de projeto para o Manipulador Plataforma de Stewart podemos concluir que:

- a) Os simuladores e ferramentas desenvolvidos não envolvem o projeto integral: cinemática, dinâmica do manipulador e controle. Alguns trabalhos se enfocam mais no análise da cinemática (**Falco, Zhang e Chen (2007), Rosario et al. (2007), Sapiro (1998), Advani et al. (2002)**) sem chegar ao projeto do controlador; outros trabalhos simplesmente abordam a dinâmica do manipulador testando novas técnicas de controle sem abordar aspectos da cinemática que podem ser considerados importantes no projeto integral do manipulador (**Dasgupta e Mruthyunjaya (1998), Liu et al. (2000), Li et al (2002), Nadimi et al. (2006), Guo e Li (2006), Li e Salcudean (1997), Fasse e Gosselin (1998),**

Su et al. (2004), Remillard e Boukas (2006), Ghobakhloo et al. (2006), Davliakos e Papadopoulos (2007), You et al (2004)).

- b) Nas ferramentas de projeto (**20SIM, SIMULATION SOFTWARE ENGINEERING, The MathWorks**) não consideram aspectos do projeto do manipulador correspondentes ao modelo cinemático, tais como: singularidades e o volume de trabalho.
- c) Os simuladores revisados neste trabalho não permitem avaliarmos novas técnicas de controle, por serem muito fechados, não permitindo modificações em sua estrutura.

Finalmente, os simuladores e os pacotes de simulação aplicados à Plataforma de Stewart não aprofundam em aspetos fundamentais associados à cinemática, aspetos que podem determinar o desempenho de uma plataforma de Stewart, direcionando os próximos capítulos desse trabalho para apresentação das diferentes etapas necessárias para o desenvolvimento de um ambiente de simulação para o MPS.

Capítulo 3

Modelagem do Manipulador Plataforma de Stewart (MPS)

Um manipulador Plataforma de Stewart (MPS) é do tipo paralelo com seis graus de liberdade. Esta classe de manipulador tem alta rigidez, exatidão no posicionamento e razão *capacidade de carga no efetuador final – peso manipulador* elevada (devido ao fato que a carga é distribuída nas diferentes cadeias cinemáticas que ligam o efetuador final à base fixa do efetuador final) (Dasgupta; Mruthyunjayab, 1998). Estes manipuladores apresentam muitas vantagens e são largamente utilizados nas mais diversas aplicações, dentre elas: simuladores de vôo, sistemas maquinas ferramentas e dispositivos hápticos.

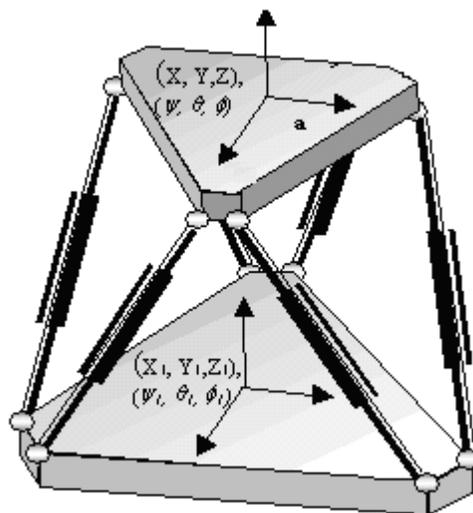


Figura 22: Manipulador Plataforma de Stewart

Um MPS consiste em dois corpos rígidos: a base e a plataforma móvel, conectados através de seis pernas extensíveis com articulações no extremo (figura 22). Cada perna extensível tem dois links ligados através de uma articulação prismática. As articulações que ligam as pernas à plataforma móvel e fixa podem ser: Universais (U) ou esféricas (E). A estrutura cinemática de um MPS pode possuir:

- Articulações esféricas nos dois extremos das pernas extensíveis, denominada 6 – $E-P-E$ (Esférica - Prismática - Esférica), conforme mostra a figura 23,
- Articulação esférica e universal nos extremos da perna, denominada 6 - $E-P-U$ (Esférica – Prismática - Universal), conforme mostra a figura 24

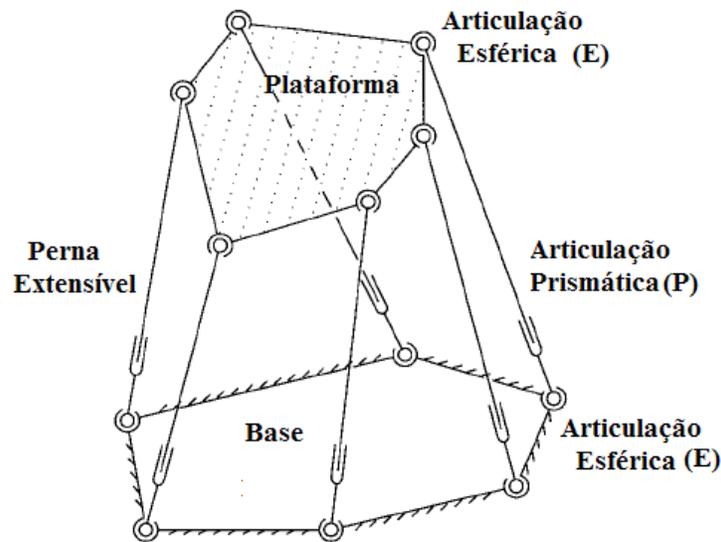


Figura 23: Plataforma de Stewart com configuração $E-P-E$

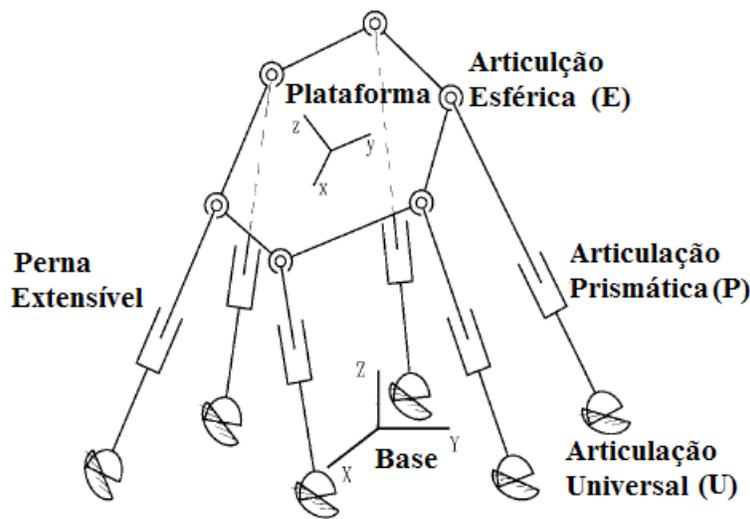


Figura 24: Plataforma de Stewart com configuração $E-P-U$

Um MPS possui características mecânicas e dinâmicas próprias, devido a sua configuração cinemática. Entre as características mecânicas que distinguem a Plataforma de Stewart encontram-se: alta precisão no posicionamento, deslocamento de altas cargas, alta rigidez e ótima resposta dinâmica.

3.1 Origens da Plataforma de Stewart

A primeira Plataforma de movimento foi projetada para a indústria do entretenimento por James E. Gwinnett, requerendo patente deste dispositivo no ano de 1928 (GWINNETT,1931). Este dispositivo considerado uma inovação complexa para a indústria daquela época era baseado no mecanismo de um manipulador esférico paralelo (figura 25).

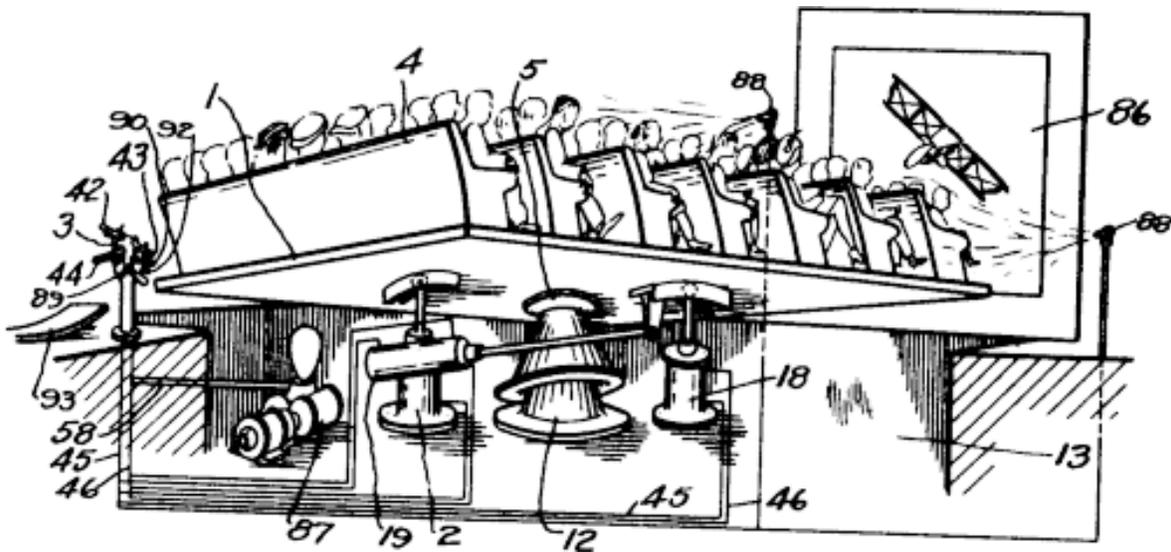


Figura 25: Plataforma para movimento projetada em 1928 (GWINNETT,1931)

O primeiro robô industrial paralelo foi projetado em 1940 por Willard L.V Pollard (POLLARD, 1940). Este manipulador de cinco graus de liberdade foi desenvolvido para pintura de peças (figura 26), sendo composto por três braços com dois ligamentos unidos através de juntas universais, dispostos na base: três motores posicionam a ferramenta enquanto outros dois atuadores realizam a orientação, transmitindo o movimento mediante a rotação de dois fios flexíveis.

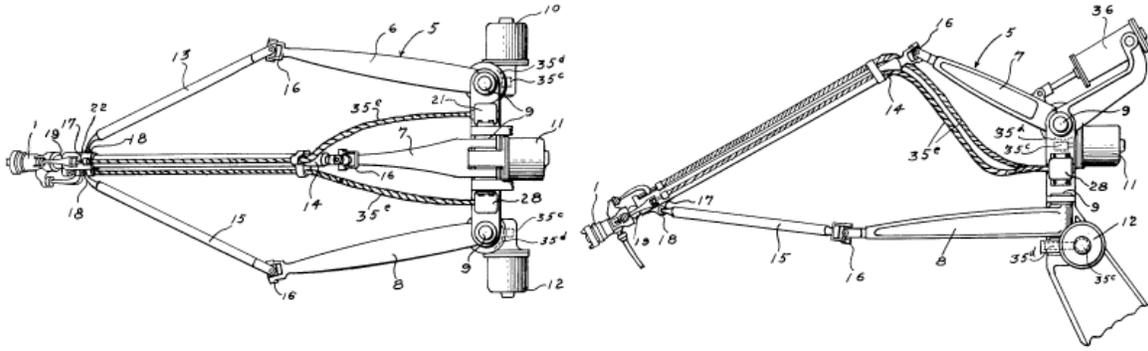


Figura 26: Robô de Pollard, Primeiro Robô paralelo industrial (POLLARD, 1940)

Em 1947, Gough projetou uma plataforma paralela com geometria octaedro hexápode, com lados de longitude variável (GOUGH, 1962). A plataforma foi desenvolvida com o objetivo de testar pneus durante o efeito do pouso de um avião, permitindo a aplicação de pequenas cargas em diferentes direções através do acionamento de atuadores hidráulicos de maneira independente (figura 27).

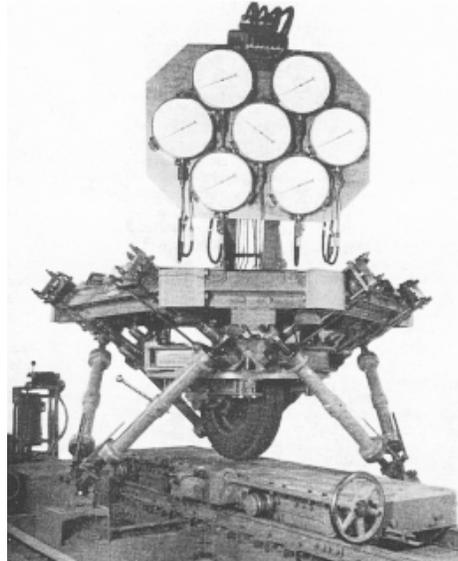


Figura 27: Plataforma Gough (GOUGH, 1962)

Em 1965, Stewart publicou um artigo considerado como precursor no desenvolvimento de plataformas paralelas, onde descreve uma plataforma com seis graus de liberdade para ser utilizada em simuladores de voo (STEWART, 1965). A configuração proposta por Stewart (figura 28) apresenta alterações consideráveis em relação à configuração proposta por Gough.

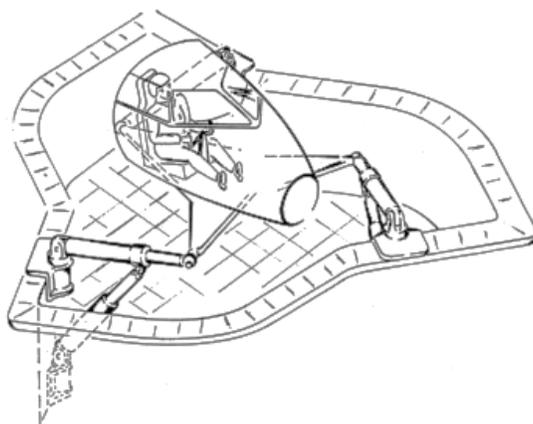


Figura 28: Plataforma de Stewart (STEWART, 1965)

Em 1971, Klaus Cappel apresentou seu simulador de movimentos baseado num hexápode. A configuração desta plataforma foi a mesma utilizada por Gough anteriormente (CAPPEL, 1967). Este simulador de movimentos foi o primeiro simulador de vôo baseado na estrutura de um hexápode octaedro, sendo resultante de um requisito da Sikorsky Aircraft Division dos Estados Unidos, especificado para projetar e construir um simulador de vôo de um helicóptero de seis graus de liberdade (figura 29).

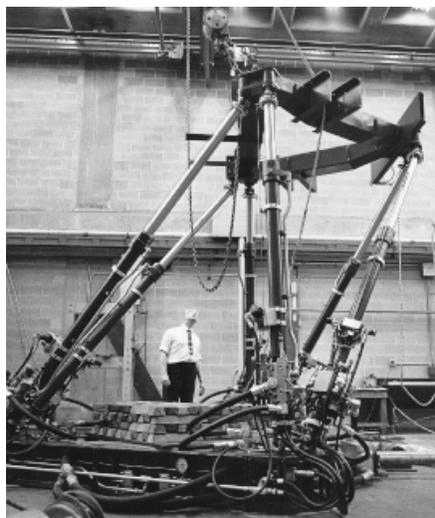


Figura 29: Simulador de movimentos de Cappel (CAPPEL, 1967)

Hunt (1978) estudou a cinemática dos mecanismos paralelos e sugeriu a utilização dos mecanismos paralelos em manipuladores em função de suas vantagens mecânicas: rigidez e precisão respeito aos manipuladores seriais. MacCallion e Pham (1979) foram os primeiros a

propor a utilização de uma plataforma paralela como elemento de uma célula flexível de manufatura.

3.2 Exemplos de aplicações da Plataforma Stewart

Uma Plataforma de Stewart pode ser considerada como um mecanismo ideal para operações que requerem uma elevada resolução de posicionamento, alta rigidez e boa resposta dinâmica. Devido às características deste mecanismo, a Plataforma de Stewart tem sido amplamente utilizada em aplicações industriais especiais, dentre elas nas áreas de aeronáutica e medicina entre outras. A seguir são apresentados alguns exemplos de aplicações da Plataforma de Stewart.

3.2.1 Simuladores de vôo

O simulador de vôo SIMONA (figura 30) utiliza uma Plataforma de Stewart acionada hidraulicamente constituída de seis graus de liberdade. Os movimentos desses graus de liberdade são controlados através de um sistema de controle multi-variável, podendo atingir uma aceleração máxima vertical de 1.5 g. Controladores robustos para os atuadores compensam as variações internas em carga, temperatura e outros efeitos. (DELF UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2008).



Figura 30: Sistema de movimento do Simulador de vôo SIMONA

3.2.2 Sistemas de locomoção bípedes

Sugahara, et al. (2005) desenvolveram um sistema de locomoção para o robô bípede WL-16RII, a partir da utilização de um mecanismo de pernas composto de duas Plataformas de Stewart invertidas (figura 31). Este sistema possui massa total aproximada de 70 Kg, incluindo suas baterias, sendo composto de atuadores lineares com servo-motores DC de 150 W de potencia com sistema de frenagem eletromagnético. Cada perna do sistema tem um mecanismo de redução de torque constituído de uma mola de gás comprimido, cuja principal finalidade é suportar as cargas axiais, para que mesmas não sejam transmitidas para os atuadores.



Figura 31: Sistema de locomoção bípede WL-16RII (SUGAHARA et al. , 2005)

3.2.3 Maquinas ferramentas com estrutura paralela

Tmg, Chen, Jar, Kang (2004) construíram na Chung Yuan Christian University (CYCU) uma maquina CNC baseada numa Plataforma Stewart, onde cada grau de liberdade é constituído de atuadores elétricos lineares, e articulações universais na plataforma fixa e

esféricas na plataforma móvel. Este equipamento é utilizado em aplicações de fresagem de peças metálicas (figura 32).

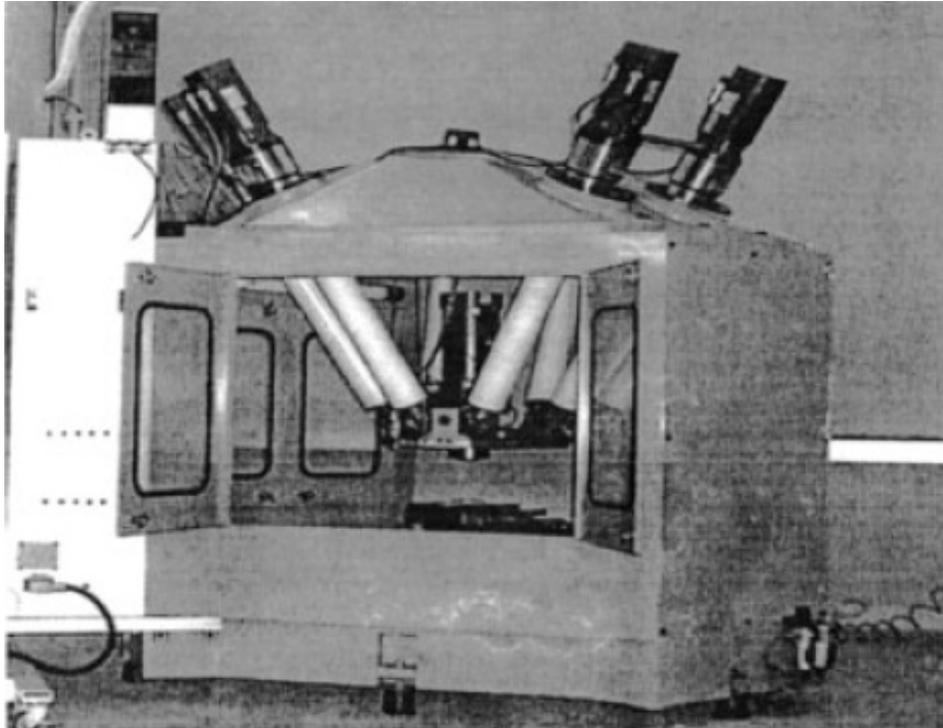


Figura 32: (CYCU) Gough–Stewart-type CNC machine. (TMG et al. 2004)

3.3.4 Manipuladores Cirúrgicos

Uma Plataforma de Stewart pode ser utilizada para micro-cirurgias em diferentes áreas da medicina. Cada vez mais novos procedimentos médicos deverão ser utilizados, dentre as quais, a implementação de novas terapias, como implante de células no futuro, que vão requerer sistemas de tele-operação capazes de atingir um posicionamento preciso e repetitivo com uma precisão de 10 μm ou superior.

Wapler, et al. (2003) utilizaram uma Plataforma de Stewart para aplicação de neuro-endoscopia, e **Wendlandt e Sastry (1994)** utilizaram esse dispositivo para manipular ferramentas para endoscopia, onde esta plataforma é operada por tendões devido à pequena escala requerida em uma endoscopia (figura 33).

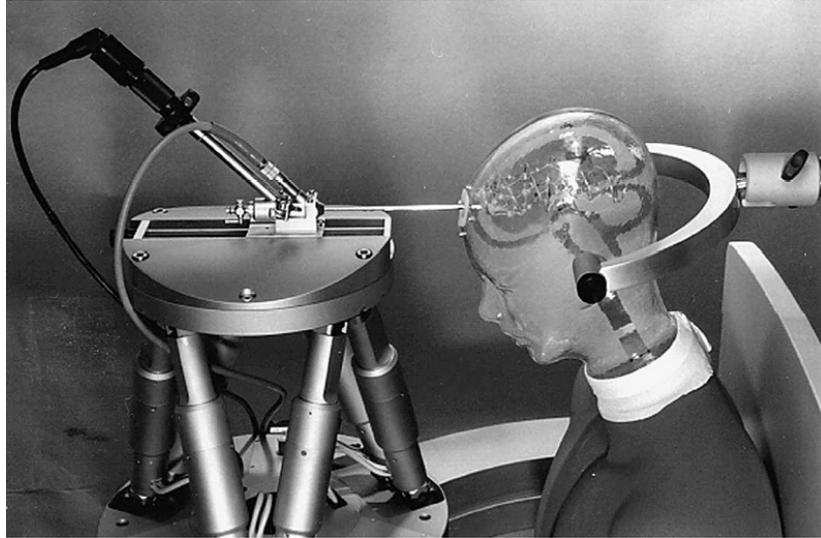


Figura 33: Plataforma de Stewart para neuroendoscopia (WAPLER et. al. , 2003)

3.2.4 Dispositivos hápticos

A idéia básica dos dispositivos hápticos é prover ao usuário uma realimentação de forças durante um movimento ou as forças necessárias para a geração de um movimento. Os dispositivos hápticos são úteis quando a realimentação visual não é suficiente e pode introduzir erros inaceitáveis na manipulação, por exemplo, cirurgia ou tele-operação de em ambientes radioativos.

Recentemente os dispositivos hápticos são mais sofisticados incluído características inovadoras. Algumas características importantes, para um alto rendimento dos dispositivos hápticos são: baixa inércia, alta rigidez, alta fricção, múltiplos graus de liberdade. Os mecanismos paralelos e especificamente a Plataforma de Stewart possuem todos estes atributos.

Robôs cirúrgicos é um exemplo de aplicação de dispositivos hápticos de alto desempenho. Eles podem prover ao cirurgião movimentos sem tremor com uma escala baixa de forças aplicadas. **Brandt et al. (1999)** desenvolveram o robô CRIGOS, um acrônimo para *Compact Robot for Image Guided Orthopedic Surgery*, que é basicamente uma Plataforma de Stewart com o objetivo de prover ao cirurgião de uma ferramenta de alto desempenho para cirurgia de ossos, sendo constituído de um manipulador e dispositivo háptico (figura 34).



Figura 34: CRIGOS Robo Brandt et al. (1999)

3.3 Modelo Cinemático

Nesta seção é desenvolvido, o modelo cinemático do manipulador. Para resolver o problema cinemático inversa é necessário definir a geometria do manipulador. O modelo cinemático inverso do MPS é direto, e o equacionamento é formulado através da observação das cadeias cinemáticas fechadas, com resolução muito simples (Kang et al., 1996). Também é desenvolvido um modelo cinemático diferencial, o qual se relaciona a velocidade nas variáveis articulares com a velocidade na plataforma móvel. Esta relação é realizada através da matriz Jacobiana, sendo também resolvido o modelo cinemático direto através da inversão dessa matriz, como também o calculo das forças estáticas.

3.3.1 Comparação do modelo MPS e Manipuladores Seriais

Numa Plataforma de Stewart o modelo da cinemática inversa é imediato, sendo resolvido através de uma observação geométrica da configuração, o mesmo não ocorrendo com a cinemática direta, cuja resolução exige a utilização de métodos numéricos ou informações de sensores adicionais. Ao contrario, manipuladores seriais apresentam uma formulação imediata da

cinemática direta ainda que a solução da cinemática inversa seja complexa, demandando a solução numérica de um sistema não linear de equações. A formulação das equações dinâmicas numa Plataforma de Stewart é complexa devido às múltiplas cadeias cinemáticas (Arai; Sheridan, 1988).

Tabela 2: Comparação entre modelo de Manipuladores Serial e MPS

		MANIPULADOR SERIAL	MPS
Cinemático	Direto	$p = f_s(\theta)$ $\dot{p} = J_s(\theta)$	$p = f_p^{-1}(l)$ $\dot{p} = J_p^{-1}(l)$
	Inverso	$\theta = f_s^{-1}(p)$ $\dot{\theta} = J_s^{-1}(\dot{p})$	$l = f_p(p)$ $\dot{l} = J_p(\dot{p})$
Estático	Direto	$F = (J_s)^{-1}\tau$	$F = J_p^T \tau$
	Inverso	$\tau = J_s^T F$	$\tau = (J_p^T)^{-1} F$

3.3.2 Graus de liberdade

O numero de liberdade de um mecanismo de cadeia cinemática pode ser obtido pelo critério de Grübler (TSAI, 1999). Nesta formula são considerados os graus de liberdade passivos do mecanismo:

$$G = \lambda(n - j - 1) + \sum_i g_i - g_p \quad (1)$$

Onde,

G : graus de liberdade do Mecanismo

λ : graus de liberdade no do espaço no qual o mecanismo tem a intenção de trabalhar

n : número de links do mecanismo, incluído o link fixo

j : número de articulações do mecanismo

j_i : número de articulações com i graus de liberdade

g_i : graus de movimento relativo permitidos pela articulação i

g_p : graus de liberdade passivos do mecanismo

Substituindo esta formula para o MPS com cadeias cinemáticas $E-P-E$, tem-se $\lambda = 6$ porque o mecanismo é espacial; $n = 14$, os dois extremos das seis pernas, a plataforma móvel e fixa; $j_1 = 6$ (das pernas extensíveis P), $j_3 = 12$ (doze articulações esféricas de 3 graus de liberdade E); $j = 18$, total de articulações; $g_p = 6$, devido à redundância por ter duas articulações esféricas nas cadeias cinemáticas.

$$G = 6(14 - 18 - 1) + (6 + 12 \times 3) - 6 = 6$$

Para o MPS com cadeia cinemática $U-P-E$, tem-se $\lambda = 6$; $n = 14$; $j_1 = 6$ (das pernas extensíveis P); $j_2 = 6$ (seis articulações universais de 2 graus de liberdade U); $j_3 = 6$ (seis articulações esféricas de 3 graus de liberdade E); $j = 18$; $g_p = 0$, nenhum grau de liberdade passiva pela configuração cinemática.

$$G = 6(14 - 18 - 1) + (6 + 6 \times 2 + 6 \times 3) = 6$$

Aplicando o critério de Grübler, comprova-se que a Plataforma de Stewart tem 6 graus de liberdade.

3.3.3 Geometria do Manipulador

A geometria do MPS é classificada segundo a distribuição das articulações nos seguintes tipos: 3-3 SPM, 6-3 SPM e 6-6 SPM (Kim et al., 1998). Na figura 35 é apresentada a classificação geométrica do manipulador.

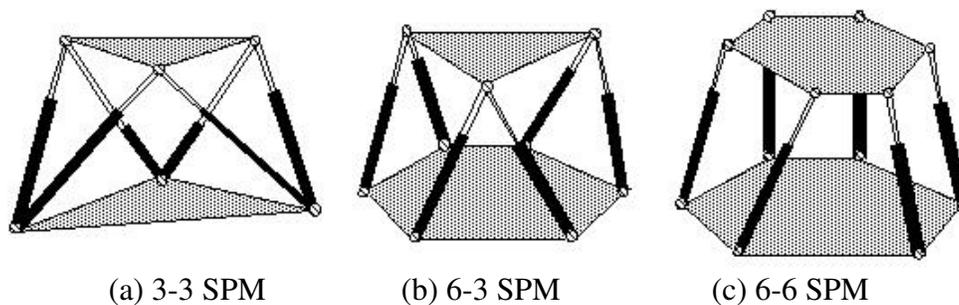


Figura 35: Geometria Manipulador Plataforma de Stewart

A base e a plataforma do manipulador, são polígonos inscritos em circunferências com raio r_a e r_b respectivamente. O polígono da base é definido pelos vetores \vec{B}_i , para $i = 1, \dots, 6$,

respeito ao sistema de referencia B . O polígono da plataforma está definido por \vec{A}_i , para $i = 1, \dots, 6$, respeito ao sistema de referencia C .

Os parâmetros que definem os vetores \vec{B}_i e \vec{A}_i , que correspondem à geometria do manipulador estão apresentados na tabela 3. Na figura 36 é apresentado graficamente o modelo geométrico do manipulador.

Tabela 3: Parâmetros que definem a geometria do manipulador

Símbolo	Parâmetro
r_a	Raio da Plataforma
ap	Ângulo da plataforma
r_b	Raio da base
ab	Ângulo da Base
\vec{A}_i	Vetor da plataforma móvel
\vec{B}_i	Vetor da base fixa

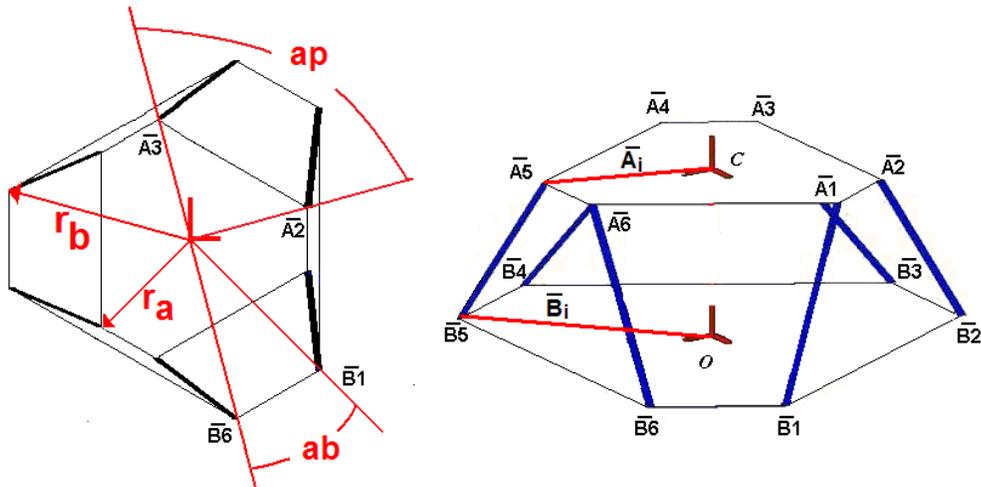


Figura 36: Definição geométrica do Manipulador

Os vetores da plataforma móvel \vec{A}_i , definidos respeito ao sistema de referencia fixo na plataforma $C (X_a, Y_a, Z_a)$ estão dados por:

$$\vec{A}_i = \begin{bmatrix} r_a \cos(\phi_i) \\ r_a \sin(\phi_i) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ix} \\ A_{iy} \\ A_{iz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\phi_i = \frac{i\pi}{3} - \frac{ap}{2} \quad i = 1,3,5$$

$$\phi_i = \phi_{i-1} + ap \quad i = 2,4,6$$

Os vetores da base \vec{B}_i , definidos respeito ao sistema de referencia fixo na base B estão dados por:

$$\vec{B}_i = \begin{bmatrix} r_b \cos(\psi_i) \\ r_b \sen(\psi_i) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{ix} \\ B_{iy} \\ B_{iz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\psi_i = \frac{i\pi}{3} - \frac{ab}{2} \quad i = 1,3,5$$

$$\psi_i = \psi_{i-1} + ab \quad i = 2,4,6$$

3.3.4 Cinemática inversa

O problema consiste em achar os valores das variáveis articulares lineares que corresponde ao cumprimento do atuador l_i , de cada uma das seis pernas extensíveis. Este problema pode ser abordado de uma maneira simples através da descrição vetorial das cadeias cinemáticas do manipulador.

A transformação da plataforma móvel á base fixa descreve-se mediante um vetor de posição \vec{p} e pela matriz de orientação \underline{R} . O vetor $\vec{p} = [x \ y \ z]$ está compreendido desde o centróide plataforma móvel $C = (X_a, Y_a, Z_a)$ até o sistema de referencia fixo na base $O = (X_b, Y_b, Z_b)$. A matriz de orientação \underline{R} é achada a partir das sucessivas rotações nos eixos x, y, z que correspondem aos ângulos RPY: γ, β e α respectivamente, então $\underline{R} = \underline{R}(\alpha, \beta, \gamma) = R(z, \alpha)R(y, \beta)R(x, \gamma)$.

onde,

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Os termos da matriz \underline{R} correspondem a:

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} cac\beta & cas\beta s\gamma - sac\gamma & cas\beta c\gamma + sas\gamma \\ sac\beta & sas\beta s\gamma + cac\gamma & sas\beta c\gamma - cas\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \quad (5)$$

Para a solução da cinemática inversa do manipulador os valores de \vec{p} e a orientação da plataforma, \underline{R} , são dados de entrada para a solução do problema. $\vec{A}_i = [A_{ix} \ A_{iy} \ A_{iz}]^T$ e $\vec{B}_i = [B_{ix} \ B_{iy} \ B_{iz}]^T$ são os vetores correspondentes geometria do manipulador definida anteriormente.

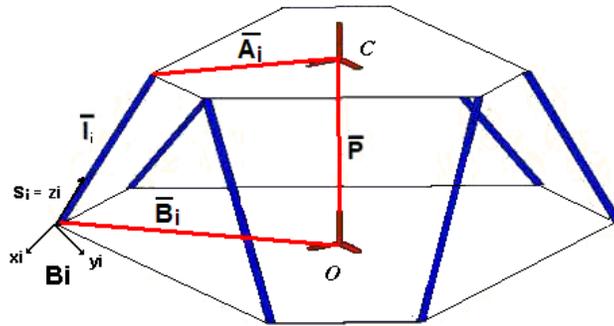


Figura 37: Representação Vetorial da Cadeia Cinematoca do Manipulador

O laço vetorial (figura 37) para cada cadeia cinemática do manipulador está dado por:

$$\vec{l} = \underline{R} \cdot \vec{A}_i^T + \vec{p}^T - \vec{B}_i^T \quad (6)$$

Onde,

$$\vec{l} = [l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4 \ l_5 \ l_6]^T - \text{vetor correspondente aos comprimentos dos atuadores}$$

O comprimento do atuador se obtém efetuando, o produto ponto do vetor \vec{l} com ele mesmo, substituído os valores,

$$l_i^2 = x^2 + y^2 + z^2 + r_a^2 + r_b^2 + 2(r_{11}A_{ix} + r_{12}A_{iy})(x - B_{ix}) + 2(r_{21}A_{ix} + r_{22}A_{iy})(y - B_{iy}) + 2(r_{31}A_{ix} + r_{23}A_{iy})(y - B_{iy}) + 2z(r_{31}A_{ix} + r_{23}A_{iy}) - 2(xB_{ix} + yB_{iy}), \text{ para } i = 1, \dots, 6 \quad (7)$$

A equação (7) é escrita seis vezes, uma para cada atuador, descrevendo assim o movimento da plataforma móvel respeito à base fixa. Os valores negativos para o comprimento

do atuador não são fisicamente possíveis, quando a solução do problema, que consiste em achar os valores do comprimento dos atuadores l_i , é um número complexo a localização da plataforma móvel não é atingível.

3.3.5 Jacobiano

É a matriz que relaciona a velocidade nos atuadores \dot{l}_i em função da velocidade na plataforma móvel $\dot{\vec{P}}$. Para o MPS, o jacobiano $[J]$, se expressa mediante a seguinte relação:

$$\dot{\vec{l}} = [J]\dot{\vec{P}} \quad (8)$$

Onde,

$\dot{\vec{l}} = [\dot{l}_1 \quad \dot{l}_2 \quad \dot{l}_3 \quad \dot{l}_4 \quad \dot{l}_5 \quad \dot{l}_6]^T$ - velocidade de entrada nos atuadores.

$\dot{\vec{P}} = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z} \quad \dot{\gamma} \quad \dot{\beta} \quad \dot{\alpha}]$ - velocidade de saída no centróide da plataforma móvel C

Outra forma de expressar a velocidade de saída $\dot{\vec{P}}$ é:

$$\dot{\vec{P}} = \begin{bmatrix} V_C \\ \omega_C \end{bmatrix} \quad (9)$$

Onde,

$V_C = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z}]^T$ Velocidade linear da plataforma móvel

$\omega_C = [\dot{\gamma} \quad \dot{\beta} \quad \dot{\alpha}]^T$: Velocidade angular da plataforma móvel

O jacobiano pode ser derivado fazendo a descrição vetorial das cadeias cinemáticas correspondentes a cada perna extensível e derivando. Para cada perna extensível tem-se:

$$\vec{p} + \underline{R}\vec{A}_i = \vec{B}_i + \overline{B}_i\vec{A}_i \quad (10)$$

Onde,

\vec{p} - posição da plataforma móvel

$\overline{B}_i\vec{A}_i$ - vetor correspondente à perna extensível do manipulador, a norma de este vetor é l_i

Diferenciando a equação anterior, tem-se:

$$V_c + \omega_c \times \vec{A}_l = l_i \omega_i \times s_i + \dot{l}_i s_i, \text{ para } i = 1, \dots, 6 \quad (11)$$

Onde,

s_i : vetor unitário na direção de l_i

ω_i : velocidade angular de cada perna respeito ao marco de referencia B

Para eliminar ω_i efetua-se o produto escalar nos dois membros da equação por s_i , então:

$$s_i \cdot V_c + (\vec{B}_l \times s_i) \omega_c = \dot{l}_i, \text{ para } i = 1, \dots, 6 \quad (12)$$

Pode-se escrever a expressão anterior da seguinte maneira:

$$[J] \dot{\vec{P}} = \dot{\vec{l}} \quad (13)$$

Escrevendo a equação do jacobiano para cada perna tem-se a seguinte expressão:

$$[J] = \begin{bmatrix} s_1^T & \dots & (b_1 \times s_1)^T \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_6^T & \dots & (b_6 \times s_6)^T \end{bmatrix} \quad (14)$$

3.3.6 Modelo cinemático direto a partir do Jacobiano Inverso

Através da matriz inversa do jacobiano, pode-se achar a posição e orientação da plataforma móvel para pequenos incrementos de orientação, e posição nos atuadores ∂q . A matriz inversa do jacobiano é achada invertendo numericamente a matriz do jacobiano.

$$\partial \vec{P} = [J]^{-1} \partial \vec{l} \quad (15)$$

Onde,

$$\partial \vec{P} = [\partial x \quad \partial y \quad \partial z \quad \partial \gamma \quad \partial \beta \quad \partial \alpha]^T$$

$$\partial \vec{l} = [\partial l_1 \quad \partial l_2 \quad \partial l_3 \quad \partial l_4 \quad \partial l_5 \quad \partial l_6]^T$$

$[J]^{-1}$: Matriz Jacobiano inverso

Esta formulação é útil para a execução de uma trajetória, onde os pequenos incrementos de comprimento nos atuadores $\partial \vec{l}$ são conhecidos.

A posição e orientação da plataforma móvel em C, para uma trajetória no espaço das juntas na qual $\vec{l}(t)$ é conhecido, pode ser expressa a trajetória no espaço de trabalho $\vec{P}(t)$ mediante o jacobiano inverso da seguinte maneira:

$$\vec{P}(t) = \vec{P}(t-1) + [J]^{-1} \partial \vec{l}(t) \quad (16)$$

Onde,

$\vec{P}(t-1)$: Posição e orientação atual da plataforma móvel respeito à plataforma fixa.

\vec{P}_{n-1} : Posição e orientação anterior

∂l_n : Incremento nos comprimentos dos atuadores

3.3.7 Modelo Estático

A força F e o momento total resultante M na plataforma estão respectivamente dados por:

$$F = \sum_{i=1}^6 s_i F_i \quad (17)$$

$$M = \sum_{i=1}^6 (b_i \times s_i) F_i \quad (18)$$

A relação das forças de saída F e M na plataforma e as forças de entrada nos atuadores F_i esta dada por:

$$\begin{bmatrix} F \\ M \end{bmatrix} = \tau = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^6 s_i F_i \\ \sum_{i=1}^6 (b_i \times s_i) F_i \end{bmatrix} \quad (19)$$

Ou,

$$\tau = HF_i \quad (20)$$

$$F_i = H^{-1}\tau \quad (21)$$

Onde,

$$H = \begin{bmatrix} s_1 & \cdots & s_6 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_1 \times s_1 & \cdots & b_6 \times s_6 \end{bmatrix} = J^T \quad (22)$$

Quando a matriz H é singular, a algumas cargas na plataforma (R e M) não podem ser suportadas pela força F dos atuadores, produzindo a perda de uma restrição ou o ganho de um grau de liberdade na plataforma, este é essencialmente o conceito das singularidades estáticas. De esta maneira o conceito da singularidade estática pode ser expresso como:

$$\det[H(\vec{P})] = 0 \quad (23)$$

3.4 Análise Cinemático do MPS

Na modelagem cinemática do MPS, a avaliação dos aspectos relacionados ao modelo cinemático, tais como as singularidades nas diferentes configurações cinemáticas e na execução de trajetórias no espaço de tarefas, constituem uma ferramenta que ajuda a determinar a condição de trabalho do MPS (**Gosselin; Angles, 1991**)

As possíveis trajetórias a serem executadas pelo MPS têm que estar inscritas na região do espaço cartesiano correspondente ao volume de trabalho, considerando que o volume de trabalho deste manipulador é pequeno. Por está razão é importante contar com este parâmetro de análise.

3.4.1 Análise das Singularidades

A diferença dos manipuladores seriais o MPS possui configurações singulares dentro do volume de trabalho, as singularidades cinemáticas são configurações nas quais o movimento da plataforma móvel em certas direções não pode ser realizado pelos atuadores. Geralmente as singularidades cinemáticas se apresentam no limite do volume de trabalho. No MPS as

singularidades preponderantes, são as singularidades estáticas ou de força, neste caso as cargas que atuam na plataforma móvel não podem se suportadas pelas forças e torques dos atuadores.

Na Plataforma de Stewart as singularidades que se apresentam, se classificam da seguinte maneira, singularidades de tipo I e singularidades de tipo II, onde:

- I. Quando o manipulador alcança as fronteiras do volume de trabalho, neste caso os atuadores atingem os valores limites que podem ser o máximo ou mínimo comprimento do atuador. Estas singularidades denominam-se singularidades cinemáticas.
- II. Quando a carga e o momento total que atua no centróide da plataforma móvel τ , não pode ser superada pelas forças dos atuadores do manipulador F_i , neste caso perde-se o controle na plataforma móvel. Estas singularidades denominam-se singularidades estáticas ou singularidades de força.

As singularidades de caso II são as mais complicadas de tratar devido a que se apresentam no interior do volume de trabalho, neste caso as cargas na plataforma móvel não podem ser transmitidas aos atuadores. As singularidades tipo II são encontradas ao ser singular (ou rank-deficiente) a matriz de transformação de forças H achada na análise estática.

É desejável que no manipulador as forças e os momentos resultantes no centróide C da plataforma móvel sejam iguais em todas as direções durante na tarefa a ser realizada, esta condição se chama *condição isotropia*. Na fase de projeto, a avaliação de esta capacidade pode ser útil para determinar a estrutura, e tamanho do manipulador que se melhor aos requerimentos de projeto.

Na parte operacional a análise das singularidades pode ser usada para achar a melhor configuração ou ponto de operação do manipulador, para a execução de um uma tarefa. Se o manipulador não é capaz de produzir forças ou momentos em alguma direção comparada com outra direção, o manipulador não trabalha eficientemente.

Um conceito importante associado à análise das singularidades no manipulador é a *ill-conditioning*. Nesta condição o manipulador não está exatamente numa condição singular, mas esta perto de uma região na qual se apresentam configurações singulares; quando o manipulador se aproxima a uma região singular podem ser requeridas grandes quantidades de forças nos atuadores para suportar as cargas na plataforma móvel.

A *ill-conditioning* pode ser identificada quando os valores do determinante da matriz H , que relaciona as forças dos atuadores, e a força e momentos resultantes no ponto C da plataforma móvel, são muito pequenos; ainda que o determinante da matriz H serve como um critério analítico das singularidades, este não é considerado um bom critério de medida de *ill-conditioning*. A melhor medida da *ill-conditioning* é o número de condição, que é o razão entre o maior e menor dos valores singulares da matriz H . O número de condição se faz infinito para uma configuração singular. Na prática a *ill-conditioning* pode ser medida com o número de condição:

$$k(\vec{P}) = \text{cond}[H(\vec{P})] \quad (24)$$

A decomposição de valor singular (DVS) aplica-se para analisar como isotropicamente as forças e os momentos são produzidos na plataforma móvel. Aplicando-se o DVS à matriz J^T , tem-se:

$$J^T = U\Sigma V^T = U \begin{bmatrix} S & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} V^T \quad (25)$$

Onde,

$S = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_6)$ e $\sigma_1 > \dots > \sigma_6 > 0$. A matriz S contém os valores singulares da matriz J em ordem crescente.

$U \in R^{m \times m}$: matriz de valores de entrada ortonormais

$V^T \in R^{n \times n}$: matriz de valores de saída ortonormais

A razão de σ_1 e σ_6 , ou o máximo e mínimo valor singular, pode ser usado como um indicador da isotropia do manipulador. Este índice é o número de condição e entre mais próximo este valor da unidade a condição do manipulador é mais *isotrópica*. O número de condição está dado por:

$$k = \frac{\sigma_1}{\sigma_6} \quad (26)$$

No **Anexo I** são explicados os fundamentos matemáticos do DVS.

Para um MPS com os seguintes parâmetros: $r_a = 100\text{mm}$, $\alpha = 90^\circ$, $r_b = 150\text{mm}$, $\beta = 30^\circ$ e na posição $\vec{P} = [0 \ 0 \ 100 \ 0 \ 0 \ 0]$, o jacobiano está dado por:

$$J = \begin{bmatrix} -0.0737 & -0.6239 & 0.7780 & 20.1373 & -75.1534 & -58.3534 \\ -0.5034 & -0.3758 & 0.7780 & 75.1534 & 20.1373 & 58.3534 \\ 0.5771 & 0.2481 & 0.7780 & 55.0161 & 55.0161 & -58.3534 \\ 0.5771 & 0.2481 & 0.7780 & -55.0161 & 55.0161 & 58.3534 \\ -0.5034 & 0.3758 & 0.7780 & -75.1534 & 20.1373 & -58.3534 \\ -0.0737 & 0.6239 & 0.7780 & -20.1373 & -75.1534 & 58.3534 \end{bmatrix}$$

Da DVS são achados os valores singulares da matriz D , onde $\sigma = [142.9361 \ 134.7620 \ 134.7620 \ 1.9058 \ 1.0107 \ 1.0107]$. O número de condição está dado por: $k = \sigma_1/\sigma_r = 141.4220$

3.4.2 Avaliação de trajetória

Para verificar que em uma trajetória do ponto inicial P_i ao ponto final P_f não se apresentem configurações singulares no manipulador é avaliado o número de condição k do jacobiano em todas as configurações correspondentes à trajetória:

$$k(\vec{P}) = \text{cond}[J(\vec{P})] \quad (27)$$

Ao se aproximar o manipulador numa região singular o valor do número de condição, k aumenta; como critério de avaliação das singularidades o número de condição pode ser avaliado

para evitar as configurações singulares na execução de uma trajetória. Nas regiões singulares do volume de trabalho o determinante do jacobiano é zero (figura 38).

A medida que o manipulador se afasta destas regiões o número de condição diminui. **Dasgupta e Mruthyunjaya (1998)** desenvolvem um gerador de trajetórias que evita as regiões singulares avaliando o número de condição.

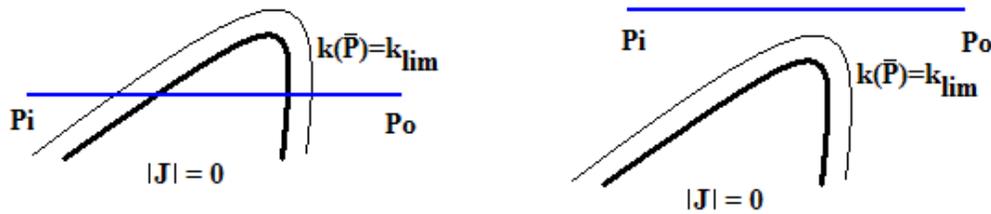


Figura 38: Trajetórias perto de regiões Singulares

A melhor maneira para medir ill-conditioning é com o número de condição (**Arai; B.Sheridan, 1988**), para valores que é a divisão do maior entre o menor valor singular da matriz

3.4.3 Análise do volume de trabalho

O MPS tem um volume de trabalho relativamente pequeno comparado com os manipuladores seriais, é importante determinar o volume de trabalho na etapa de projeto para tornar estes mais competitivos, maximizando o volume de trabalho. Não obstante, devido à complexidade do mecanismo de cadeias cinemáticas fechadas, a determinação do volume de trabalho é muito complexa.

Para o MPS o volume de trabalho tem diferentes representações. Dentre as representações mais usadas encontram-se:

- *Volume de trabalho constante*: todos os pontos possíveis do espaço cartesiano que podem ser alcançados pelo centróide da plataforma móvel (X_a, Y_a, Z_a) com orientação constante.
- *Volume de trabalho total*: todos os pontos possíveis do espaço cartesiano que podem ser alcançados pelo centróide da plataforma para um conjunto predefinido de orientações.

- *Volume de trabalho máximo*: todos os pontos possíveis do espaço cartesiano que podem ser alcançados pelo centróide da plataforma (X_a, Y_a, Z_a) com uma pelo menos uma orientação possível.

Vários autores têm trabalhado no volume de trabalho do MPS. **Gosselin et al. (1992)** determinam o volume de trabalho constante a partir da intersecção de seis volumes, cada um deles é a diferença entre a esfera de radio l_{max} (comprimento máximo do atuador), cujo centro é o ponto B_i transladado pelo vetor A_iC e a esfera com o mesmo centro e de radio l_{min} (comprimento mínimo do atuador). A beira do espaço de volume de trabalho, constante pode ser descrito como a suma dos intervalos das regiões em varias esferas.

Kim et al. (1997) desenvolvem um método geométrico, no qual a partir da geometria do manipulador e as restrições de comprimento dos atuadores determina o volume de trabalho constante e total. Nesta metodologia para facilidade na derivação das equações no manipulador de 6 DOF são considerados somente dois links.

O volume de trabalho total cartesiano do MPS para uma orientação constante está dado pela intersecção de seis pares de esferas. O centro de cada esfera esta no ponto $\vec{B}_i^T - \underline{R}\vec{A}_i^T$, para $i = 1, \dots, 6$. Para um par de esferas onde centro é o mesmo, na esfera maior o raio é l_{i_max} que corresponde ao limite máximo do atuador e para a esfera menor o raio é l_{i_min} que corresponde ao comprimento mínimo do atuador.

Os limites gerados pelos vetores l_i e q_i formam as seguintes esferas, onde a região sombreada na figura 39 pode ser alcançada pelo ponto C:

$$(\vec{OA}_i - \vec{B}_i) \cdot (\vec{OA}_i - \vec{B}_i) = l_{max}^2 \quad S_{imax} \quad (28)$$

$$(\vec{OA}_i - \vec{B}_i) \cdot (\vec{OA}_i - \vec{B}_i) = l_{min}^2 \quad S_{imin} \quad (29)$$

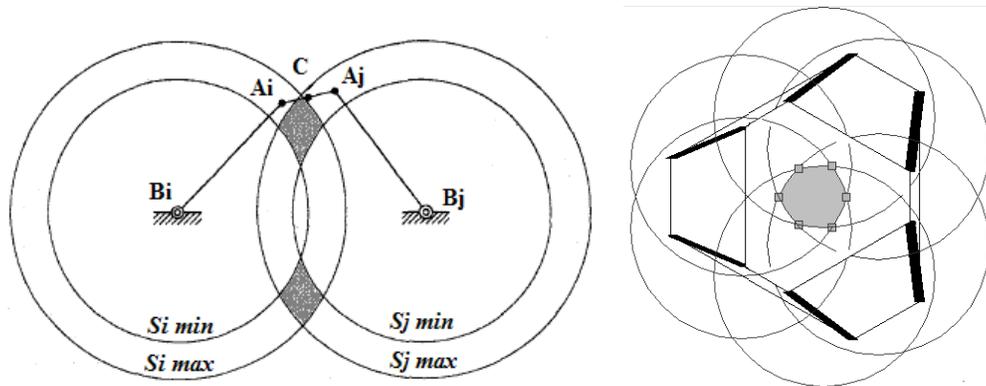


Figura 39: Região onde os links podem alcançar.

3.5 Considerações Finais

Um manipulador Plataforma de Stewart (MPS), do tipo paralelo com seis graus de liberdade, apresenta alta rigidez, exatidão no posicionamento e razão capacidade de carga - peso elevada no efetuador final, apresentando assim, muitas vantagens em relação aos manipuladores seriais, sendo largamente utilizados nas mais diversas aplicações industriais.

Neste capítulo foram apresentados alguns exemplos industriais de aplicações de MPS, tais como: simuladores de vôo, sistemas máquinas ferramentas e dispositivos hápticos, e aspectos relacionados a modelagem cinemática desse manipulador.

Nos próximos capítulos dessa dissertação de mestrado serão apresentados conceitos necessários para a modelagem do simulador cinemático e do sistema de controle no espaço de juntas de um manipulador MPS.

Capítulo 4

Implementação de Ambiente de Simulação Cinemática e Controle no Espaço das Juntas

O software desenvolvido tem como propósito, constituir uma ferramenta de análise que permita avaliar o desempenho cinemático e comportamento dinâmico de um Manipulador Plataforma de Stewart (MPS).

O objetivo final desta ferramenta é projetar o controle no espaço das juntas desse dispositivo robótico. Esse software foi implementado a partir do desenvolvimento de dois módulos: Simulação cinemática e simulação dinâmica conforme mostra a figura 40.

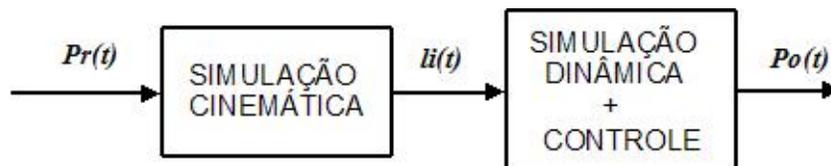


Figura 40: Diagrama da ferramenta desenvolvida.

Na simulação cinemática de um MPS, foi desenvolvida uma aplicação que permite a entrada de modo fácil dos dados correspondentes aos parâmetros do modelo geométrico. Os resultados desta simulação são telas gráficas, nas quais são verificadas a configuração cinemática e a tarefa a ser executada pelo manipulador. Entre as principais características analisadas nesta aplicação encontram-se: solução do problema cinemático inverso, avaliação das singularidades, cálculo do volume de trabalho, avaliação de limites de movimento e execução de trajetórias. Os limites de movimento de um MPS avaliados são obtidos a partir dos comprimentos mínimos e máximos

dos atuadores, colisão entre pernas do manipulador e superação de limite nas articulações passivas.

Na simulação dinâmica de um MPS são desenvolvidas rotinas a partir do modelo dinâmico do MPS, que permitem o cálculo das forças produzidas pelo mecanismo do manipulador para uma determinada trajetória. Na simulação dinâmica também são considerados os efeitos dinâmicos dos atuadores em cada uma das pernas. A finalidade da simulação da dinâmica é projetar o sistema de controle no espaço das juntas.

De maneira global, a ferramenta de simulação cinemática implementada gera uma trajetória de referência no espaço das juntas a partir do conhecimento de uma trajetória no espaço de trabalho. A trajetória de referencia no espaço das juntas é utilizada como sinal de referência para o controle de posição do manipulador no espaço das juntas.

4.1 Projeto de Ambiente de Simulação

O ambiente de simulação proposto no presente trabalho segue a arquitetura mostrada na seção anterior. A proposta de simulação foi implementada utilizando o *MATLAB*, para a simulação cinemática e interface da simulação dinâmica foi utilizado o *GUI* e na simulação dinâmica, para a simulação dinâmica foi utilizado o *SIMULINK* de *MATLAB*, no seguinte diagrama (figura 41) é apresentada a maneira como foi implementada o ambiente de simulação.

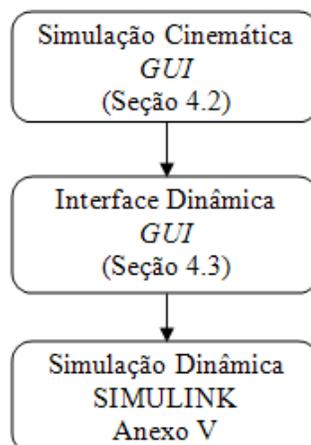


Figura 41: Implementação Ambiente de Simulação

No anexo V são apresentadas algumas recomendações para o uso do ambiente de simulação e também é apresentada em mais detalhe a implementação em diagramas de blocos das equações a ser estabelecidas no capítulo V correspondentes ao modelo dinâmico do manipulador e a arquitetura de controle.

4.2 Projeto de Simulador cinemático

Na simulação cinemática do manipulador são abordados todos os assuntos concernentes a modelagem cinemática desenvolvida no capítulo anterior desse trabalho. Com este objetivo foi desenvolvido uma aplicação que permite a entrada dos parâmetros que definem a geometria e as especificações dos movimentos a serem executados pelo manipulador. Os dados de entrada que definem a configuração do manipulador para a simulação são os seguintes:

- Parâmetros geométricos
- Localização da plataforma móvel
- Localização do manipulador respeito ao sistema de referencia total
- Especificação de trajetória no espaço de trabalho cartesiano

Em função do posicionamento espacial e orientação em relação ao sistema de referencia principal, são determinadas a posição do centróide da plataforma móvel C e as posições das articulações A_i . Os fundamentos matemáticos relacionados a este tópico são apresentados no anexo II deste trabalho.

O posicionamento de uma plataforma móvel será realizado a partir de pequenos deslocamentos nos eixos x - y - z associados ao centróide da plataforma móvel do manipulador. Para a orientação do centróide da plataforma móvel respeito ao sistema de referencia principal são utilizados como parâmetros de entrada os ângulos *roll-pitch-yaw* (RPY). A partir destes ângulos são definidas as rotações nos eixos x - y - z respectivamente na plataforma móvel respeito ao sistema de C .

Os movimentos de um MPS são restritos por três diferentes condições: limite mecânico do comprimento máximo e mínimo dos atuadores lineares, limites mecânicos das juntas passivas (Esféricas e Universais), colisões entre as pernas extensíveis (atuadores).

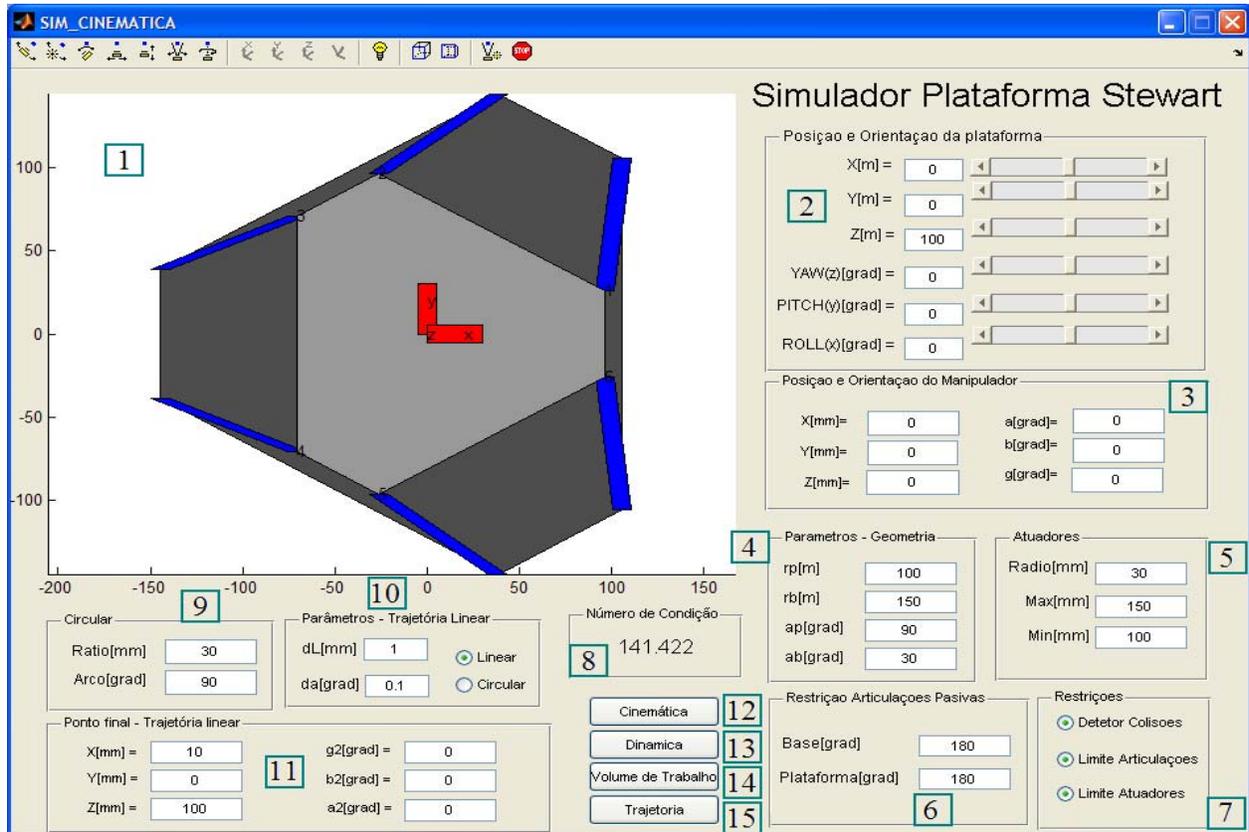


Figura 42: Tela gráfica do simulador cinemática

Neste trabalho foram desenvolvidas ferramentas de simulação a partir dos conceitos abordados durante o presente trabalho utilizando o software MATLAB 7.0. O objetivo desta ferramenta foi simular o modelo do projeto conceitual de uma Plataforma Stewart, a partir da implementação da Modelagem cinemática do manipulador, que utiliza as ferramentas do ambiente GUI (figura 42). As unidades dos dados de entrada, correspondentes aos comprimentos dos atuadores são em milímetros e os ângulos das juntas em graus. Os números apresentados na tela gráfica do simulador são apresentados na tabela 4.

Os algoritmos implementados no ambiente virtual de simulação fundamentam-se no modelo do MPS estabelecido no capítulo 3 desse trabalho.

Os movimentos do manipulador em função das trajetórias e as configurações cinemáticas são visualizados na tela. Na aplicação também é mostrado o número de condição para todas as configurações cinemáticas.

Tabela 4: Funções do Simulador Cinemático

Nº	FUNCIONALIDADE
1	Tela de visualização
2	Controle Posição e orientação da plataforma móvel
3	Posição e orientação inicial do Manipulador
4	Parâmetros Geométricos
5	Geometria Atuadores
6	Limites de Articulações passivas
7	Permitir Restrições
8	Número de condição
9	Parâmetros trajetória Circular
10	Parâmetros trajetória
11	Ponto final trajetória linear
12	Execução Cinemática
13	Visualização da tela para Simulação Dinâmica
14	Calculo do volume de trabalho
15	Visualização da execução da trajetória

4.2.1 Representação geométrica e cinemática do MPS

Com a finalidade de ilustrar as possibilidades na representação do modelo geométrico, a solução do modelo cinemático e a avaliação destes, expõem-se três casos diferentes. Estes três casos correspondem a uma classe de geometria do MPS: 3-3 SPM, 6-3 SPM, 6-6 SPM.

Desta forma, para cada caso são utilizados diferentes parâmetros geométricos e configurações cinemáticas. Para alguns destes casos se apresentam configurações não desejadas, tais como: colisão de pernas e superação nas restrições do comprimento máximo e mínimo dos atuadores e articulações passivas. Os fundamentos matemáticos da análise das colisões são apresentados no anexo III.

- **CASO 1: 3-3 MPS**

No caso 1, é representado um 3-3 MPS, utilizando os seguintes parâmetros geométricos: $r_a = 100$ mm, $r_b = 150$ mm, $a_p = 115^\circ$, $a_b = 5^\circ$. A ferramenta implementada é mostrada na figura 43.

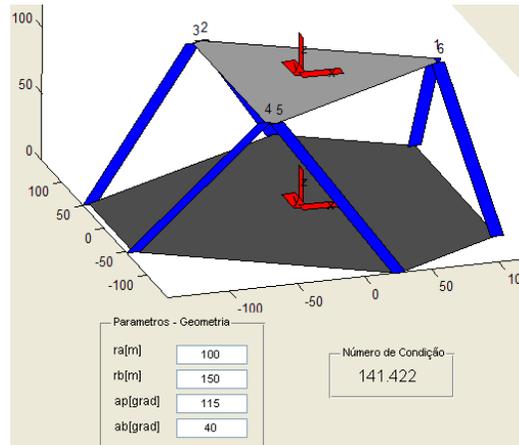


Figura 43: Caso 1: 3-3 MPS

Para a geometria anteriormente definida, são definidas também diferentes posições e orientações para a plataforma móvel do manipulador. Na figura 44a, o posicionamento espacial da plataforma móvel está dado por $\vec{P} = [20 \ -30 \ 100 \ 0 \ 10 \ 0]^T$. Na figura 44b são mudadas a posição e orientação da plataforma móvel, $\vec{P} = [0 \ 0 \ 100 \ 30 \ 0 \ 0]^T$.

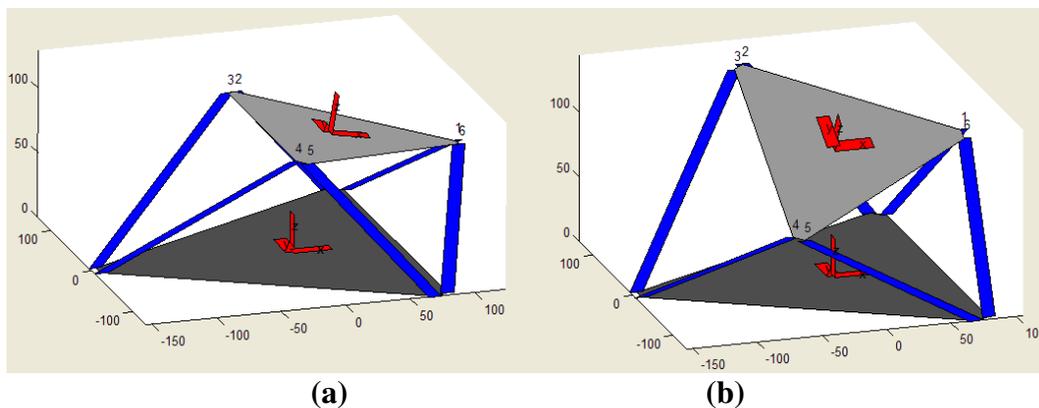


Figura 44: Localizações do MPS para o caso 1

No caso 1, muda-se a posição e orientação da plataforma móvel a $\vec{P} = [0 \ 0 \ 100 \ 0 \ 0 \ 90]^T$, para esta localização há colisão entre as pernas do MPS, como é mostrado na figura 45. No anexo III são apresentadas as colisões e a maneira como aso tratadas.

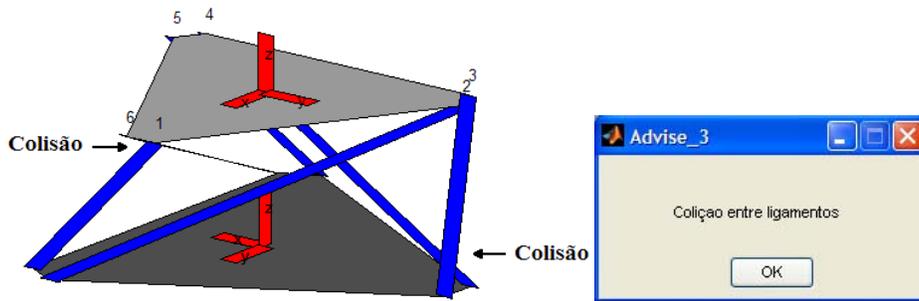


Figura 45: Colisão entre pernas

- **CASO 2, 6-3 MPS**

Para o caso 2, são alterados os parâmetros geométricos: $r_a = 100$ mm, $r_b = 150$ mm, $a_p = 115^\circ$, $a_b = 40^\circ$. A representação geométrica é apresentada na figura 46, que corresponde a um manipulador 6-3 MPS.

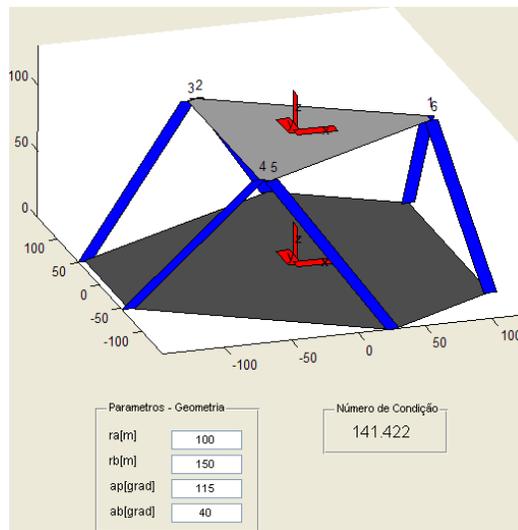


Figura 46: Caso 2, 6-3 MPS

Para este manipulador são definidas a posição e orientação na plataforma móvel $\vec{P} = [0 \ 0 \ 100 \ 0 \ 0 \ 30]^T$. Na figura 47a, apresenta a configuração inicial desta plataforma e a figura 47b, a posição e orientação da plataforma móvel para uma nova posição $\vec{P} = [0 \ 10 \ 120 \ 0 \ 20 \ 0]^T$.

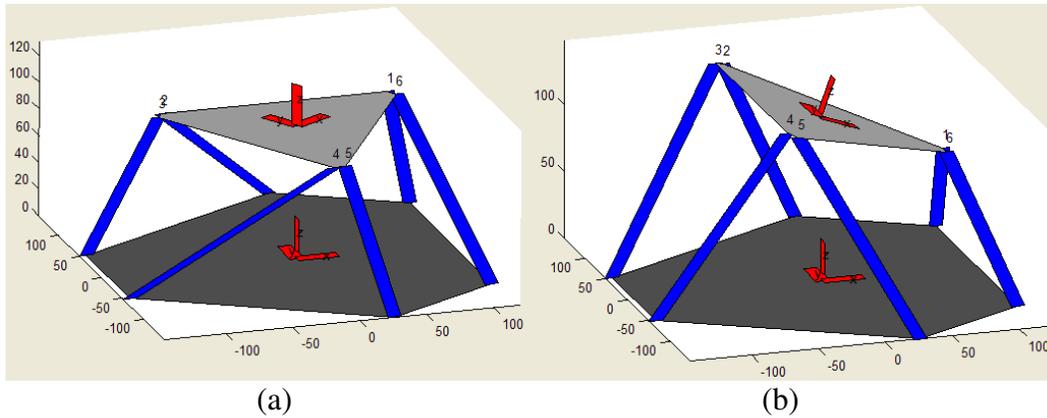


Figura 47: Localizações do MPS para o caso 2

- **CASO 3, 6-6 MPS**

O ultimo caso considerado foi o de um manipulador 6-6 MPS. Os parâmetros geométricos utilizados são: $r_a = 100$ mm, $r_b = 150$ mm, $a_p = 90^\circ$, $a_b = 30^\circ$. A principal diferença entre os casos apresentados anteriormente foi que a localização inicial do manipulador não coincide com o sistema de referencia principal O . O deslocamento e mudança de orientação são fornecidos a partir de: $\vec{P}_I = [0 \ 20 \ 170 \ 0 \ 180 \ 0]^T$. Através desta nova orientação o manipulador fica invertido (figura 48).

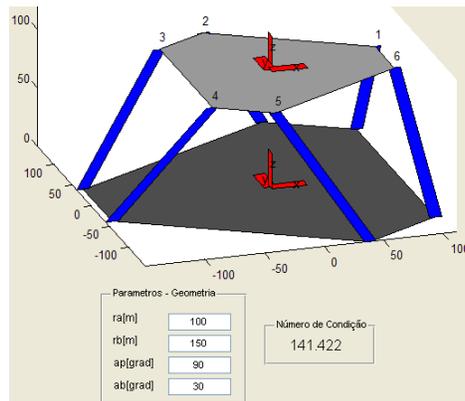


Figura 48: Caso 3, 6-6 MPS

A posição da plataforma móvel na figura 49a é $\vec{P} = [0 \ 0 \ 100 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ e a posição da plataforma móvel na figura 49b é $\vec{P} = [10 \ 20 \ 110 \ 30 \ 0 \ 0]^T$. A localização da plataforma móvel é definida respeito ao sistema de referencia W .

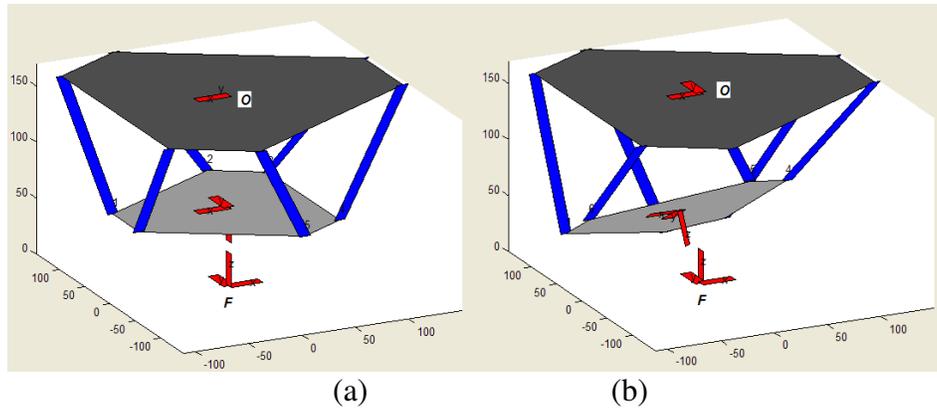


Figura 49: Posição e orientação do MPS para caso 3

Para este mesmo caso, se $\vec{P} = [0 \ 0 \ 110 \ 0 \ 43 \ 0]^T$ as articulações apresentadas na figura 50 superam o valor limite de 90° estabelecido na simulação.

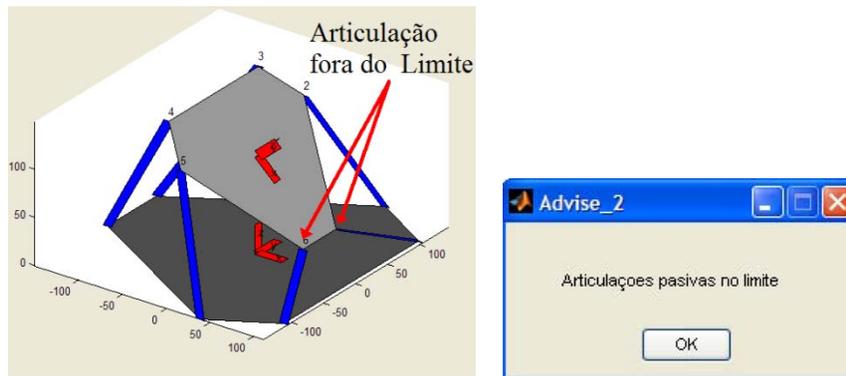


Figura 50: Articulações passivas fora do limite

4.2.2 Trajetória no espaço de trabalho.

Para uma trajetória no espaço de trabalho cartesiano são geradas as trajetória para cada uma das variáveis articulares em função do tempo. Na figura 51 apresenta-se o valor da cada variável articular em função do tempo para uma trajetória circular com os seguintes parâmetros:

Ponto inicial: $P_o = [30 \ 0 \ 100 \ 0 \ 0 \ 0]$

Raio = 30 mm

Arco = 360°

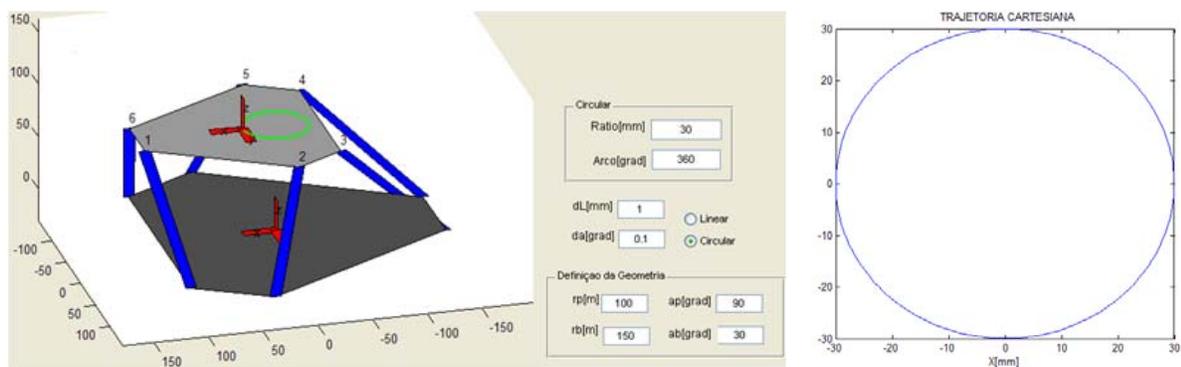


Figura 51: Espaço das Juntas para Trajetoria Linear

A figura 52 apresenta as trajetórias para cada um dos atuadores correspondente as variáveis de junta, correspondentes a implementação de uma trajetória cartesiana circular apresentada anteriormente.

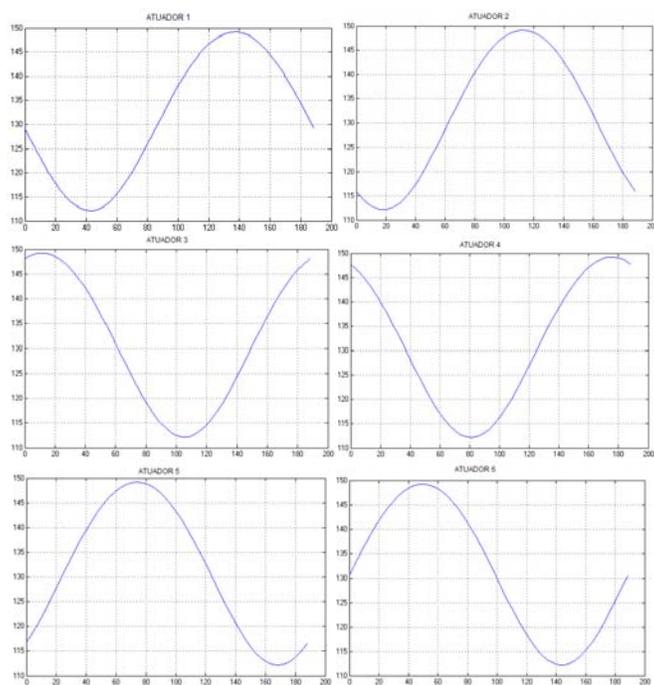


Figura 52: Trajetórias das variáveis articulares

Para esta mesma trajetória circular é avaliado o número de condição, que define a condição na cinemática na qual o manipulador está executando a trajetória. Na figura 53 é mostrado o numero de condição para a trajetória.

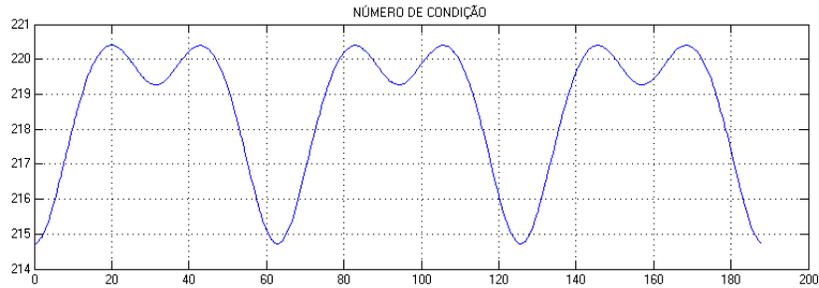


Figura 53: Trajetórias das variáveis de juntas – Número de Condição.

4.2.3 Volume de trabalho

O volume de trabalho constante calculado para os seguintes parâmetros: $r_a=100$ mm, $r_b=150$ mm, $a_p = 90^\circ$ $a_b = 30$ e orientação em $[\gamma,\beta,\alpha] = [0,0,0]$. Na figura 54 é mostrado o volume de trabalho calculado.

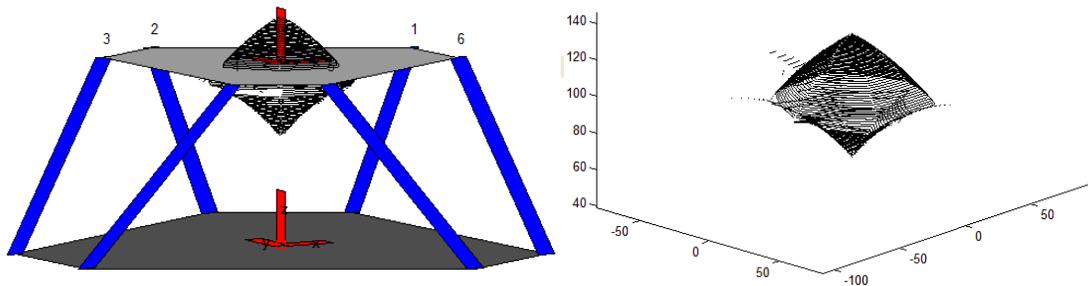


Figura 54: Volume de trabalho constante para um MPS

O volume de trabalho calculado para os seguintes parâmetros: $r_a=110$ mm, $r_b=150$ mm, $a_p = 90^\circ$ $a_b = 30$ e orientação em $[\gamma,\beta,\alpha] = [0,0,0]$ (Figura 55).

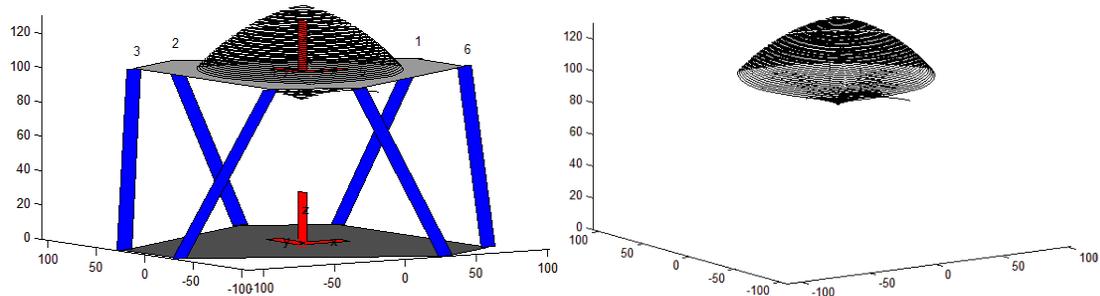


Figura 55: Volume de trabalho para o MPS a partir da alteração de r_a

O volume de trabalho constante é obtido a partir das considerações enunciadas no modelo cinemático na seção 3.4.3 do capítulo anterior.

4.3 Simulação Dinâmica

O principal objetivo desta ferramenta foi simular o comportamento dinâmico da Plataforma Stewart, a partir da implementação da Modelagem dinâmica do manipulador e seu sistema de controle a partir da utilização das ferramentas do ambiente GUI. A tela correspondente à simulação dinâmica é apresentada na figura 56 e na tabela 5 são apresentados os parâmetros correspondentes.

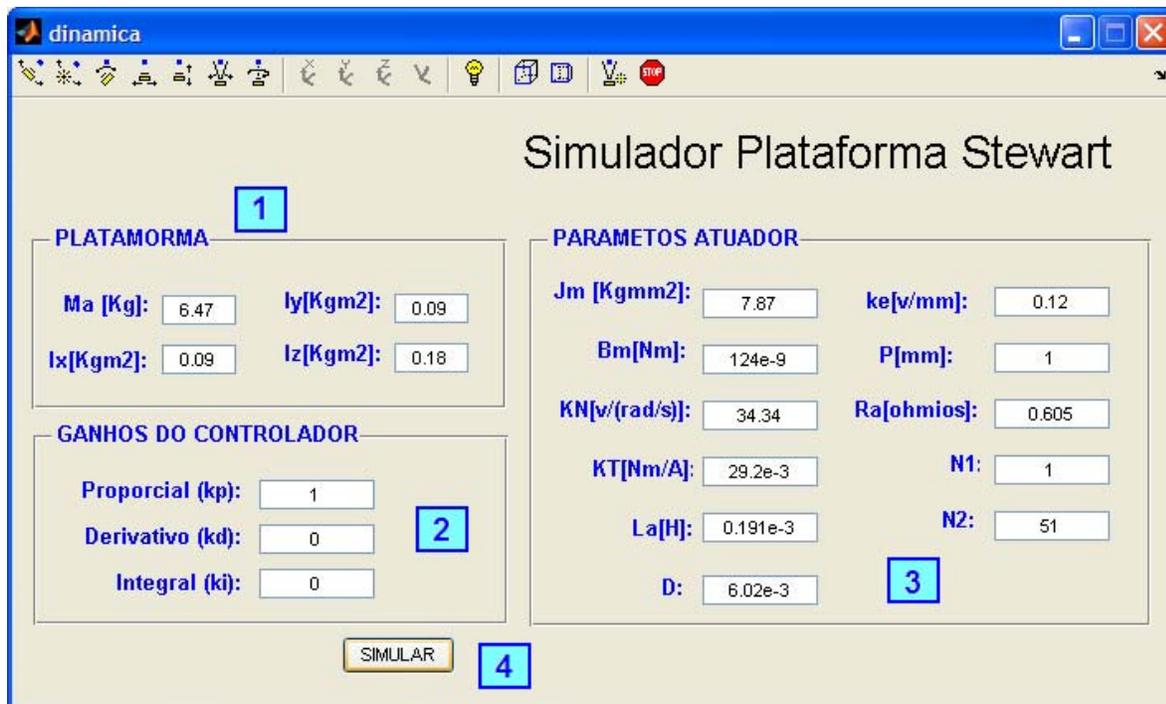


Figura 56: Tela da simulação dinâmica

A função da tela da simulação dinâmica é servir como interface de entrada para os parâmetros da simulação dinâmica e controle. Entre os parâmetros da simulação dinâmica estão: propriedades inerciais da plataforma móvel, parâmetros do atuador e as ganhos do controlador.

Tabela 5: Parâmetros do simulador dinâmico

	FUNÇÃO
1	Inércia e massa da Plataforma
2	Parâmetros do controlador
3	Parâmetros do atuador
4	Execução da Simulação dinâmica

No próximo capítulo desta dissertação são apresentados fundamentos matemáticos básicos, tais como modelagem dos atuadores, dinâmica do manipulador e arquitetura de controle do manipulador. O modelo desenvolvido no próximo capítulo permitiu a implementação das rotinas desenvolvidas para a simulação.

4.4 Considerações finais

A partir da apresentação das características do aplicativo desenvolvido são formuladas as considerações finais com base nas observações registradas. Conseqüentemente, o simulador cinemático implementado permite a representação de qualquer geometria para um MPS, em função dos parâmetros de entrada r_a , r_b , a_p , a_b . Conseqüentemente, a partir do conhecimento de quatro parâmetros, torna-se possível a redefinição de uma nova geometria de um MPS, permitindo visualizar e avaliar imediatamente as implicações de alterações no modelo.

Aspectos importantes de projeto associados para a aplicação, tais como: detecção de colisões, limites máximos nas articulações passivas, torna-se possível avaliarmos estes aspectos para diferentes configurações cinemáticas de um MPS. Por exemplo, podemos deixar a geometria do manipulador constante e alterar a posição e orientação da plataforma móvel para avaliarmos o número de condição ou possibilidade de colisões entre as partes do manipulador.

Finalmente, o volume de trabalho constante de um manipulador Plataforma de Stewart permite avaliarmos facilmente ao alterar a geometria do manipulador, permitindo assim, determinar e planejar as operações do manipulador no interior de seu espaço de trabalho.

Capítulo 5

Modelagem do Sistema de Acionamento e Controle

A dinâmica associada ao manipulador produz forças e torques que se opõem ao movimento das trajetórias de referência $\vec{l}(t)$, calculada para cada variável articular l_i durante a simulação cinemática. Possíveis erros de posicionamento podem ocorrer durante a execução de trajetórias do manipulador devido à dinâmica do manipulador (LEWIS et al. 2004).

Neste capítulo, inicialmente será apresentado o modelo dinâmico direto de um MPS, associado ao modelo dos atuadores de posicionamento do manipulador, onde serão modelados as forças e torques em função da trajetória de referencia no espaço de trabalho do manipulador. Finalmente é apresentada a arquitetura de controle no espaço das juntas para controlar posição dos diferentes graus de liberdade de um MPS.

Na figura 57 é apresentado o diagrama geral do sistema de acionamento e controle de um MPS, baseado na descrição matemática apresentada no capítulo, onde foi descrita a modelagem e simulação correspondente à cinemática deste manipulador.

Cada grau de liberdade do manipulador (perna) possui um atuador elétrico que produz um deslocamento linear $l_{di}(t)$, cuja referencia é o comprimento $l_i(t)$ gerado no modelo cinemático.

Para calculo da dinâmica do manipulador são computadas as forças F_i que atuam sobre cada atuador em função da trajetória cartesiana $\vec{P}(t)$, sendo desenvolvido o modelo dinâmico direto do MPS. Assim, cada uma das pernas é realimentada a variável de saída $l_{di}(t)$ para o controle de posição. Finalmente, para comprovar a trajetória saída no espaço de trabalho $\vec{P}_o(t)$

em relação a trajetória de referência $\vec{P}(t)$ foi utilizado o modelo jacobiano direto associado a um MPS.

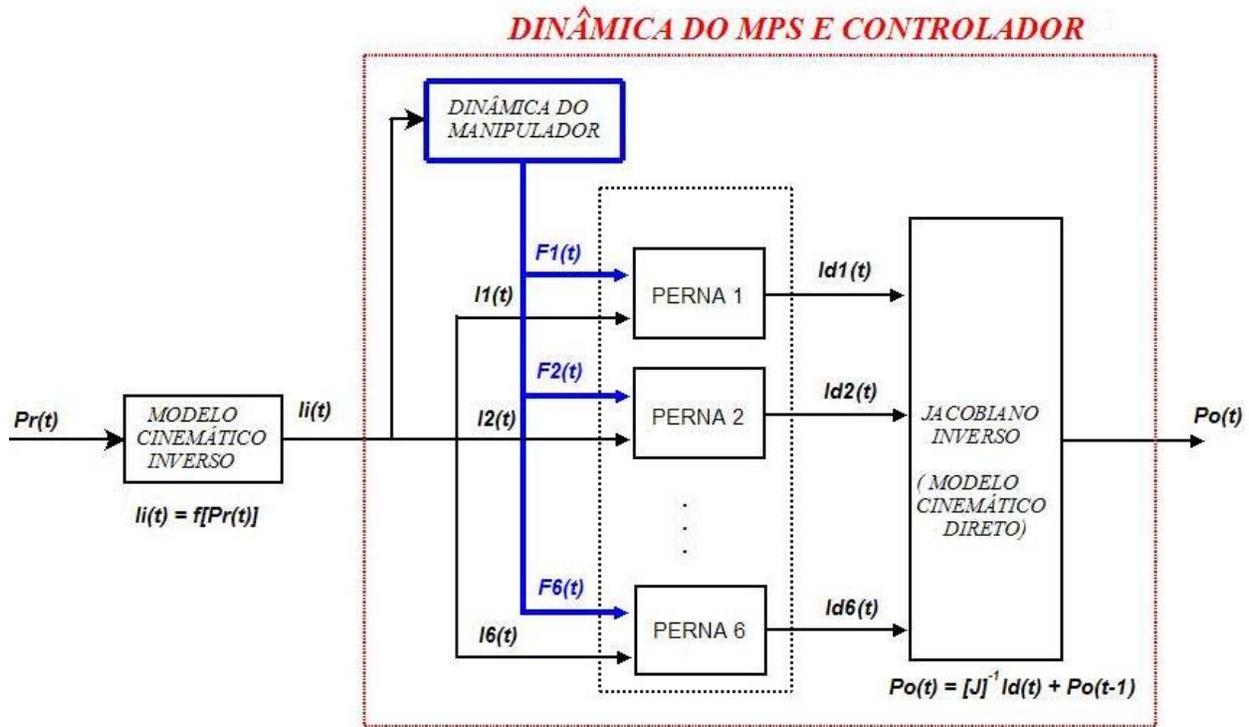


Figura 57: Diagrama geral do sistema de acionamento e controle.

O principal objetivo deste capítulo concerne à modelagem do sistema de acionamento e controle de cada um dos graus de liberdade de um MPS, a partir do desenvolvimento dos seguintes tópicos:

- Desenvolvimento do modelo matemático para um atuador linear, composto de um motor de corrente contínua, um sistema de transmissão redutor- parafuso sem fim
- Desenvolvimento do modelo dinâmico associado ao manipulador.
- Implementação da arquitetura de controle e a malha do controle de posição no espaço as juntas.

5.1 Modelo dinâmico associado ao manipulador MPS e atuadores

Para implementação de um simulador que contemple o sistema físico a ser construído, que permita a obtenção de resultados práticos referentes a modelagem, simulação e análise dinâmica a partir do sistema simulado, torna-se imprescindível o conhecimento exato dos parâmetros reais de todos os componentes envolvidos na simulação.

Dentro do escopo principal delineado nesse trabalho de pesquisa, utilizaremos como base de simulação, atuadores elétricos com parâmetros bem conhecidos e fornecidos pelo fabricante, caso contrário seria necessário a utilização de ferramentas matemáticas para identificação dos parâmetros dos mesmos, fugindo do objetivo principal de nosso trabalho.

5.1.1 Modelagem de Atuadores lineares

Um atuador linear, conforme é mostrado na figura 58, é composto dos seguintes elementos:

- a) Motor de corrente contínua,
- b) Sistema de transmissão mecânica com um redutor planetário e um parafuso sem fim e,
- c) Encoder incremental (sensor de posição).



Figura 58: Atuador linear

As referencias para cada junta do manipulador $l(t)$ é um sinal de referencia para atuador, mediante o ganho do encoder K_e , que é transformado numa tensão de entrada para o motor $v(t)$.

A força atuante em cada perna do manipulador $F(t)$, pode ser obtida a partir do modelo dinâmico direto manipulador, sendo proporcional ao torque de perturbação $T_d(t)$ no atuador. A posição angular de saída no rotor do manipulador $\theta(t)$ é transformada num deslocamento linear no parafuso do atuador $l_d(t)$ após ser transmitida pelo redutor planetário N e o parafuso sem fim P . O diagrama de blocos correspondente ao modelo do atuador linear é apresentado na figura 59.

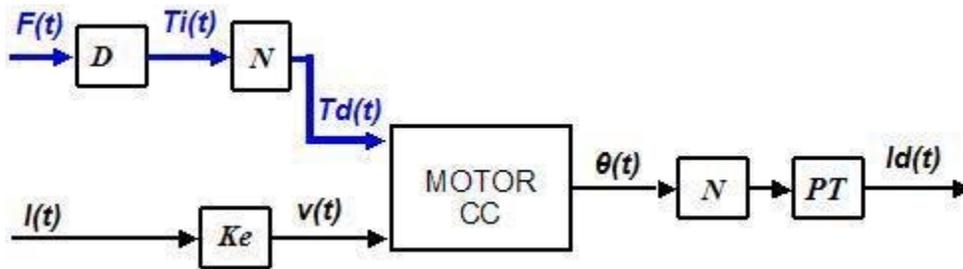


Figura 59: Diagrama do atuador

No parafuso sem fim disposto no eixo do motor, conforme mostra a figura 60, é necessário expressar o torque $T_{di}(t)$ em função da força de entrada $F_i(t)$.

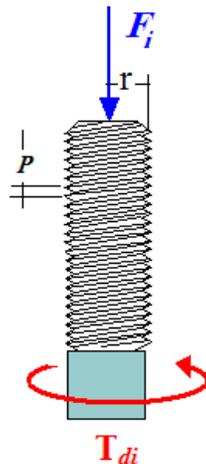


Figura 60: Conversão de torque para força no parafuso sem fim.

$$T_{di} = \frac{F_i r}{2\pi} = D F_i \quad (30)$$

$$D = \frac{r}{2\pi} \quad (31)$$

O diagrama de blocos apresentado na figura 61 mostra um motor de corrente contínua controlado através da tensão de armadura:

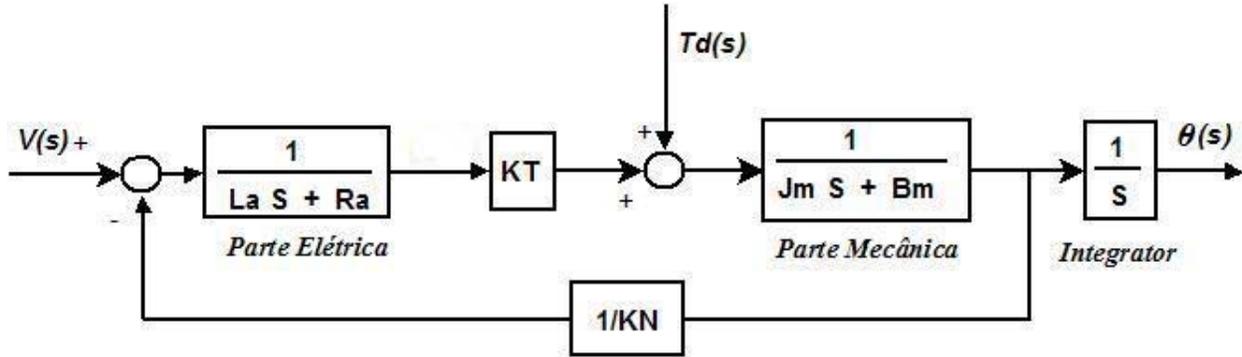


Figura 61: Diagrama de Blocos - Motor de corrente contínua

Tabela 6: Parâmetros motor

Parâmetros	Símbolo	Unidade
Resistência na Armadura	R_a	Ω
Indutância na Armadura	L_a	mH
Constante de Torque	K_T	mNm/A
Constante de velocidade	K_N	rpm/V
Constante mecânica	τ_m	ms
Inércia do Rotor	J_m	gcm ²
Constante de tempo elétrica	τ_e	ms

A equação correspondente à parte elétrica é representada por:

$$v(t) = L_a \frac{di(t)}{dt} + R_a i(t) + e(t) \quad (32)$$

onde,

$$e(t) = K_N \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (33)$$

A equação correspondente à parte mecânica é representada por:

$$T_m = J_m \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + B_m \frac{d\theta(t)}{dt} + T_d \quad (34)$$

onde,

$$T_m = K_T i(t) \quad (35)$$

O movimento angular do motor é transformado a um movimento linear no parafuso. O modelo matemático correspondente a esta transformação é:

$$L_d(t) = N P \theta(t) \quad (36)$$

Normalmente, o fabricante fornece todos os parâmetros associados ao motor, com exceção do atrito viscoso B_m . Para encontrarmos este parâmetro é necessário encontrar o polinômio característico correspondente a função de transferência de todo o sistema que é:

$$\frac{W(s)}{V(s)} = \frac{K_T}{L_a J_m s^2 + (J_m R_a + B_m L_a) s + K_N K_T + R_a B_m} \quad (37)$$

$$\frac{W(s)}{V(s)} = \frac{K_T}{\left(s + \frac{1}{\tau_m}\right) \left(s + \frac{1}{\tau_e}\right)} \quad (38)$$

Encontrando os pólos do sistema,

$$s = \frac{-(R_a J_m + B_m L_a) \pm \sqrt{(R_a J_m + B_m L_a)^2 - 4 L_a J_m (K_N K_T + R_a B_m)}}{2 L_a J_m} \quad (39)$$

Para $(R_a J_m + B_m L_a)^2 - 4 L_a J_m (K_N K_T + R_a B_m) > 0$

Com $L_a \ll \frac{(R_a J_m + B_m L_a)^2}{J_m (K_N K_T + B_m)}$ pode usar-se a aproximação $\sqrt{1-x} = 1 - \frac{x}{2}$

Conseqüentemente,

$$s = \frac{-(R_a J_m + B_m L_a) \pm (R_a J_m + B_m L_a) \left(1 - \frac{2 L_a J_m (K_N K_T + R_a B_m)}{(R_a J_m + B_m L_a)^2}\right)}{2 L_a J_m} \quad (40)$$

Para encontrarmos, o pólo correspondente à constante mecânica τ_m ,

$$s = \frac{-(R_a J_m + B_m L_a) + (R_a J_m + B_m L_a) \left(1 - \frac{2L_a J_m (K_N K_T + R_a B_m)}{(R_a J_m + B_m L_a)^2}\right)}{2L_a J_m} \quad (41)$$

$$s = -\frac{\left(\frac{2L_a J_m (K_N K_T + R_a B_m)}{(R_a J_m + B_m L_a)}\right)}{2L_a J_m} \quad (42)$$

$$s = -\frac{K_N K_T + R_a B_m}{R_a J_m + B_m L_a} \quad (43)$$

Expressando o pólo em função da constante mecânica,

$$s = -\frac{1}{\tau_m} \quad (44)$$

Então,

$$\frac{1}{\tau_m} = \frac{K_N K_T + R_a B_m}{R_a J_m + B_m L_a} \quad (45)$$

Achando os dos pólos do polinômio característico,

$$s_1 = -\frac{R_a}{L_a} \quad e \quad s_2 = -\frac{K_N K_T + R_a B_m}{R_a J_m + B_m L_a} \quad (46)$$

No **anexo IV** deste trabalho apresenta uma aplicação e verificação do modelo para o atuador linear **GP 32 S** do fabricante **MAXOM**.

5.1.2 Modelo dinâmico do manipulador

O desenvolvimento matemático e análise do modelo dinâmico de um manipulador são importantes em vários campos de estudo de um MPS, entretanto a obtenção das equações dinâmicas do mesmo não é imediata, devido à estrutura formada por cadeias cinemáticas

fechadas. A importância do modelo dinâmico pode ser verificada de diversas maneiras, dentre elas podemos destacar:

- a) Dimensionamento estrutural, sistema de acionamento e transmissão mecânica, inclusive componente (atuadores lineares, rotulas, rolamentos, etc),
- b) Especificação do Sistema completo de Acionamento e Controle, com ênfase no desenvolvimento de novas estratégias de controle.
- c) Simulação do sistema robótico, considerando diferentes tarefas sem necessidade de mexer no sistema robótico real.

Dentro desse contexto, diferentes métodos têm sido aplicados para a obtenção do modelo dinâmico do MPS, entre eles: método de Newton Euler, a *formulação de Lagrange*, o *princípio do trabalho virtual* e o *método de Kane*. Podemos destacar os seguintes trabalhos:

- a) **Dasgupta e Mruthyunjaya (1998)** derivaram a equação dinâmica para um MPS utilizando o método de Newton-Euler.
- b) **Lebret e Lewis (1993)** derivaram as equações dinâmicas utilizando a equação de Lagrange para o movimento.
- c) **Gallardo et al. (2003)** aproximaram a formulação dinâmica mediante a combinação da teoria dos helicóides (*screw theory*) e o *princípio de trabalho virtual*.
- d) **Tsai (2000)** utiliza o *princípio de trabalho de virtual* para achar a equação dinâmica de um manipulador paralelo com seis graus de liberdade.

Neste trabalho a obtenção da formulação dinâmica da Plataforma é realizada através da metodologia proposta por **Guo e Li (2006)** que utiliza a combinação dos métodos de Lagrange e Newton-Euler para expressar a formulação dinâmica de um MPS através de uma equação fechada e compacta no espaço de trabalho.

Na simulação e controle do manipulador, a formulação do modelo dinâmico pode causar dificuldades para calcular todos os termos da equação dinâmica. Escolher a representação da formulação dinâmica mais apropriada, dependendo das condições de trabalho da Plataforma de Stewart e os aspectos a serem analisados, simplificará o problema, evitando complicações desnecessárias para a sua análise.

A equação dinâmica no espaço de trabalho, é representada por uma aproximação de segunda ordem, possuindo a seguinte forma:

$$M_a(\vec{P})\ddot{\vec{P}} + C_a(\vec{P}, \dot{\vec{P}})\dot{\vec{P}} + G(\vec{P}) = J^T(\vec{P})F_i \quad (47)$$

onde, $M(\vec{P})$ é a matriz que contém os efeitos dinâmicos devidos à inércia, $V(\vec{P}, \dot{\vec{P}})$ a matriz que contém os efeitos devidos à aceleração de Coriolis e $G(\vec{P})$ o termo relativo aos efeitos gravitacionais. O vetor F_i representa a força em cada atuador e J^T é a transposta da matriz jacobiana.

Segundo **Ji (1993)**, o modelo dinâmico de um MPS pode ser decomposto para desenvolvimento da análise dinâmica das pernas e da plataforma móvel independentemente. A equação completa correspondente ao modelo dinâmico da plataforma móvel e das pernas (atuadores), sendo obtido através da somatória dos efeitos dinâmicos da plataforma móvel e das pernas. Para cada termo desta equação dinâmica têm-se:

$$M(\vec{P}) = M(\vec{P})_a + M(\vec{P})_{perna} \quad (48)$$

$$C(\vec{P}, \dot{\vec{P}}) = C(\vec{P}, \dot{\vec{P}})_a + C(\vec{P}, \dot{\vec{P}})_{perna} \quad (49)$$

$$G(\vec{P}) = G(\vec{P})_a + G(\vec{P})_{perna} \quad (50)$$

Li e Salcudean (1997) afirmam que a dinâmica das pernas pode ser desconsiderada em relação à análise da dinâmica total do manipulador do MPS, baseando-se em simulações feitas do MPS e a comparação do mesmo com o protótipo experimental. Aplicando-se o critério anterior, consideraremos somente o modelo da dinâmica correspondente a plataforma móvel do manipulador, mediante este critério a formulação dinâmica é simplificada com o objetivo de chegar ao objetivo de nosso trabalho, que é a implementação do sistema de controle do manipulador no espaço das juntas.

Inicialmente, determinaremos a velocidade angular da plataforma móvel, em relação ao sistema de referencia da plataforma móvel C , em função dos ângulos de Euler. A velocidade na plataforma móvel será dada pela velocidade angular ω_C :

$$\omega_C = \dot{\alpha}z + \dot{\beta}y' + \dot{\gamma}x'' \quad (51)$$

$$\omega_C = \underline{R}(z, \alpha)\underline{R}(y', \beta)\underline{R}(x'', \gamma)[0 \ 0 \ \dot{\alpha}]^T + \underline{R}(y', \beta)\underline{R}(x'', \gamma)[0 \ \dot{\beta} \ 0]^T + \underline{R}(x'', \gamma)[\dot{\gamma} \ 0 \ 0]^T \quad (52)$$

$$\omega_C = (-\sin \beta + \cos \beta \sin \gamma + \cos \beta \cos \gamma)\dot{\alpha} + (\cos \gamma - \sin \gamma)\dot{\beta} + \dot{\gamma} \quad (53)$$

Expressando a velocidade ω_C na forma matricial,

$$\omega_C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\gamma} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (54)$$

A velocidade angular em relação ao sistema de referencia total O , será obtida por:

$$\tilde{\omega} = R\tilde{\omega}_C R^T \quad (55)$$

Onde $\tilde{\omega}_C$ é a matriz anti-simétrica associada ao vetor $\omega_C = [\omega_{C1} \ \omega_{C2} \ \omega_{C3}]^T$, que é

$$\omega = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{C3} & \omega_{C2} \\ \omega_{C3} & 0 & -\omega_{C1} \\ -\omega_{C2} & \omega_{C1} & 0 \end{bmatrix} \quad (56)$$

Agora são calculadas as forças em cada perna, em função de trajetória seguida pela plataforma móvel. Para derivar a equação dinâmica da plataforma, é considerado o método de *Newton-Euler*. Considerando em equilíbrio as forças que atuam na plataforma, a equação de Newton para a plataforma será dada através da relação:

$$(m_a \mathbf{I})\ddot{\mathbf{p}} = \sum_{i=1}^6 \mathbf{f}_i - m_a \mathbf{g} \quad (57)$$

Onde m_a é a massa da plataforma incluindo a carga. Considerando os momentos respeito ao ponto C da plataforma móvel, a equação de *Euler* para plataforma será dada por:

$$(\underline{R}\underline{I}_a\underline{R}^T)\ddot{\underline{P}} + \tilde{\omega}\underline{R}\underline{I}_a\underline{R}^T\omega = \sum_{i=1}^6 (\underline{R}\underline{p}\underline{R}^T)_i \mathbf{f}_i \quad (59)$$

A partir das duas equações anteriores tem-se:

$$M_a \ddot{\vec{P}} + C_a \dot{\vec{P}} + m_a \mathbf{g} = H(\vec{P}) F_i \quad (59)$$

Onde,

$$M_a = \begin{bmatrix} m_a \mathbf{I} & 0 \\ 0 & \underline{R} I_a \underline{R}^T \end{bmatrix} \quad (60)$$

$$C_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \tilde{\omega} \underline{R} I_a \underline{R}^T \end{bmatrix} \quad (61)$$

Uma vez calculadas as forças devidas aos efeitos dinâmicos do mecanismo: forças inerciais, forças de aceleração de Coriolis e forças gravitacionais, em função de uma trajetória no espaço de trabalho.

No modelo dinâmico total de um MPS as forças que se opõem ao movimento do manipulador, são calculadas e somadas para achar a força na direção de cada atuador $F_i(t)$. A força $F_i(t)$, é transformada através de uma transmissão num torque $T_d(t) = D N F_i(t)$, entrando no atuador como um torque de perturbação. Na figura 62, é apresentado um diagrama de blocos representando como são calculadas cada um dos membros correspondentes à equação dinâmica de um MPS.

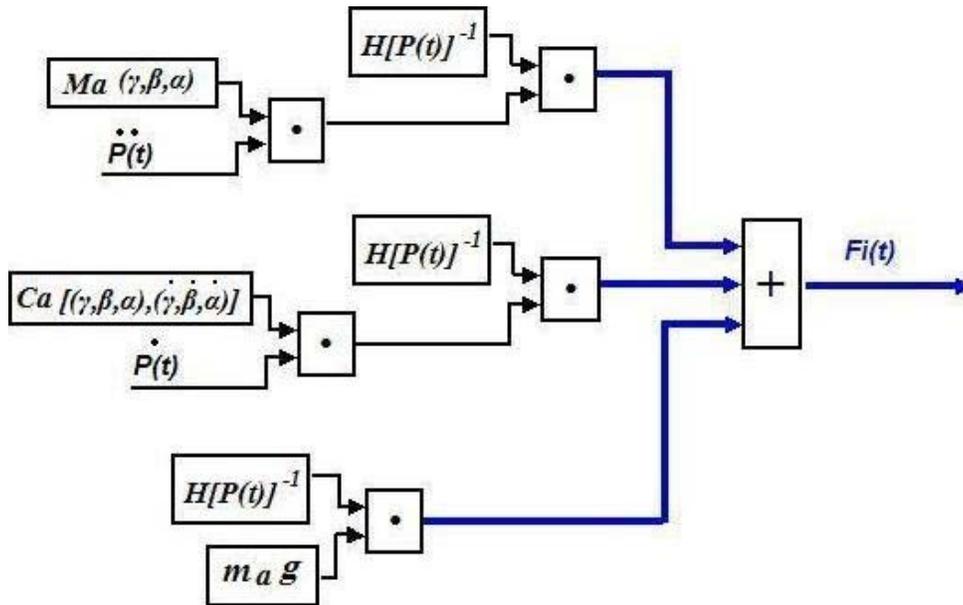


Figura 62: Diagrama de Blocos correspondente ao modelo dinâmico de um MPS.

5.2 Arquitetura de controle no espaço das Juntas

Segundo Ghobakhloo et al. (2006) num MPS, os controladores PID clássicos tem sido freqüentemente utilizados na indústria, entretanto nem sempre garantem o um alto rendimento nos manipuladores paralelos. A dupla redução das forças produzidas pela dinâmica do manipulador, devido ao parafuso sem fim D e de um redutor planetário N , reduzem a magnitude das forças produzidas pela dinâmica do mecanismo do manipulador, implicando assim, que atuador sobre o qual é realizado o controle de posição, fica sujeito a apenas uma fração das forças totais nos atuadores $F_i(t)$, reduzida por essa alta taxa de transmissão mecânica.

Ao ser minimizados os efeitos dinâmicos do manipulador aumentando a reduções mecânicas N e D , o sistema tende a ter um comportamento linear, como se estivesse somente o atuador sem a entrada de perturbação $T_d(t)$. Conseqüentemente, o controle no espaço das juntas pode ser realizado através de um controlador PID clássico, onde neste caso, o desempenho do controlador é adequado.

Na figura 63, é mostrado um diagrama de blocos esquematizando a estrutura completa de controle aplicado no espaço da juntas para cada uma das pernas de um MPS.

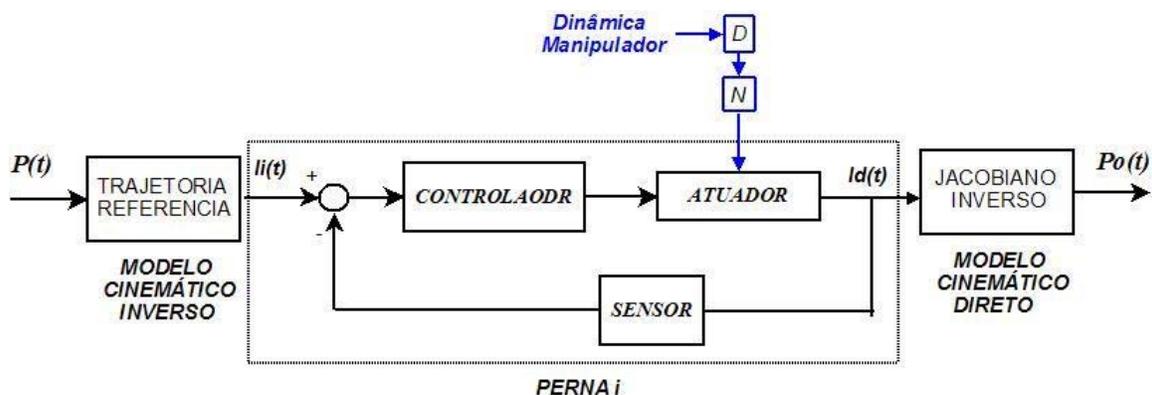


Figura 63: Estrutura de controle no espaço das juntas.

Para verificação da trajetória de saída $P_o(t)$ do manipulador utiliza-se o modelo cinemático direto de um MPS, obtida através da inversão da matriz jacobiana.

Quando um manipulador paralelo se aproxima de uma configuração singular, a matriz jacobiana inversa é singular, e conforme foi apresentado anteriormente, o manipulador se torna estaticamente indeterminado. Conseqüentemente, quando um manipulador paralelo está numa configuração singular, o numero de condição tende a infinito e os atuadores requerem uma força muito alta para realizar o movimento (**MARLET, 1989**). Assim é muito importante avaliarmos as singularidades do manipulador durante o controle de posição (**PERNG; HSIAO, 1999**)

5.3 Considerações finais

A partir do equacionamento da dinâmica de um MPS neste capítulo foram implementada rotinas computacionais para simulação da dinâmica de um MPS. A partir da implementação dos diagramas de blocos apresentados na modelagem dinâmica dos atuadores, do manipulador e a arquitetura de controle no espaço das juntas são desenvolvidas as rotinas mediante diagramas de blocos implementados no ambiente MATLAB-Simulink.

O modelo dinâmico de um MPS pode ser representado através de diagramas de blocos como foi apresentado no presente capítulo. Esta representação permite a integração do modelo dinâmico com o atuador, onde as forças dinâmicas entram no atuador como um torque de perturbação no eixo do motor.

No próximo capítulo será apresentado um estudo de casos, utilizando nestas aplicações o modelo dos atuadores, a dinâmica do manipulador e arquitetura de controle para o espaço das juntas.

Capítulo 6

Validação do simulador através do Estudo de Casos

Neste capítulo são apresentados uma série de estudos de casos de Manipuladores Plataforma de Stewart (MPS), nos quais são simulados e analisados diferentes manipuladores executando diferentes tarefas no espaço de trabalho, aplicando a metodologia proposta e o simulador implementado no presente trabalho.

Inicialmente, um estudo de caso é realizado através da simulação cinemática de uma plataforma de testes desenvolvida dentro do escopo de um projeto de pesquisa conjunto envolvendo o **CENPES-PETROBRAS** e **UNICAMP**, e posteriormente um manipulador industrial **FANUC – 200ib**. O objetivo da análise realizado com manipulador **PETROBRAS** é avaliar o desempenho cinemático de um novo protótipo na execução de tarefas específicas. No caso do manipulador **FANUC**, o simulador é utilizado para avaliar o desempenho cinemático e planejamento de novas tarefas para um manipulador industrial.

No último estudo de caso foi realizado a análise cinemática e dinâmica para um MPS utilizando nas suas juntas, atuadores elétricos lineares descritos no anexo IV desse trabalho. Com a finalidade de projetar o controle no espaço das juntas e avaliar o desempenho cinemático e desta maneira propor melhoras no protótipo analisado. Nesse estudo, o simulador é validado, sendo também discutidos os resultados obtidos com referencia no modelo estabelecido nos capítulos anteriores.

6.1 Caso I: Simulação de um MPS Petrobras

Dentro de um projeto de pesquisa envolvendo a UNICAMP/CENPES- PETROBRAS, foi implementada uma plataforma de simulação Stewart-Gough, um manipulador paralelo com capacidade para a reprodução do espectro de movimentos mar, para ser utilizado no processamento primário de fluidos, basicamente na separação de gás óleo e água **Mazoni (2003)**. Esta plataforma é acionada hidráulicamente e controlada através de sistema de controle FIELDPOINT da National Instruments, através de programa computacional implementado em ambiente LABVIEW™.

Considerando a alta potência mecânica dos atuadores e as baixas velocidades necessárias para operação desse dispositivo, os efeitos dinâmicos do manipulador foram desprezados na nossa análise. Neste caso na determinação do desempenho do manipulador nas tarefas a serem executadas foram avaliados somente os aspectos concernentes a cinemática do manipulador. A figura 64 é apresentada o protótipo desenvolvido na UNICAMP, e na tabela 6 é apresentado os parâmetros geométricos utilizados para representação do manipulador PETROBRAS no simulador implementado.



Figura 64: Protótipo desenvolvido para PETROBRAS (Mazoni, 2003).

Tabela 7: Parâmetros manipulador PETROBRAS

Parâmetro	Unidade	Valor
Raio da Plataforma [r_a]	mm	150
Ângulo da plataforma [ap]	graus	95
Raio da base [r_b]	mm	350
Ângulo da Base [ab]	graus	25
Posição inicial no eixo z	mm	543
Cumprimento máximo atuador [l_{max}]	mm	400
Cumprimento mínimo atuador [l_{min}]	mm	650

A equação 69 foi utilizada para implementação da trajetória executada pelo manipulador no espaço de trabalho e a figura 65 apresenta a visualização gráfica destas trajetórias no espaço de trabalho. Os comprimentos e deslocamentos angulares são dados em milímetros e graus respectivamente.

$$P(t) = [0 \quad 0 \quad 30 \sin 6\pi t + 543 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (62)$$

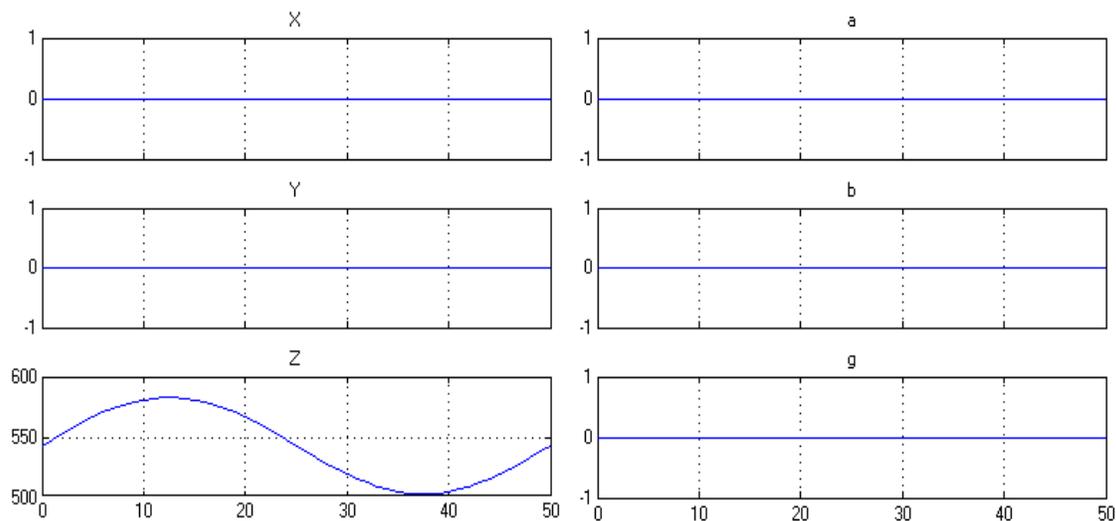


Figura 65: Trajetoria no espaço de trabalho MPS – PETROBRAS

A figura 66 apresenta a animação gráfica dos movimentos do manipulador no espaço de trabalho, executando a trajetória proposta para o simulador desenvolvido. Mediante a visualização gráfica da execução dessas trajetórias, pode-se verificar que a análise cinemática

realizada corresponde aos dados de entrada do modelo geométrico e trajetória executada pelo manipulador.

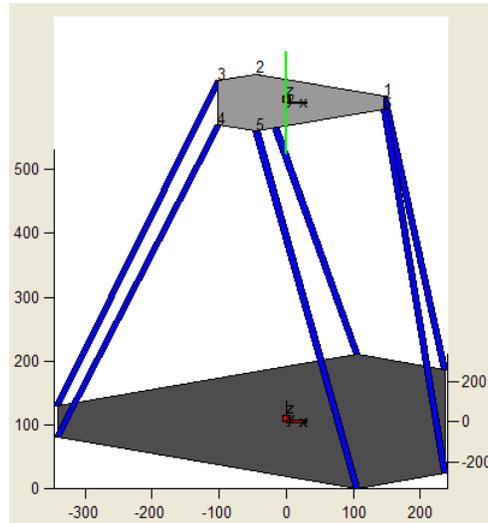


Figura 66: Modelo Geométrico e trajetória MPS – PETROBRAS

O valor das variáveis das juntas correspondente a estas trajetórias é apresentado na figura 67. Podemos observar que a trajetórias em todas as juntas é a mesma, pois o movimento do manipulador ocorre somente na direção do eixo z.

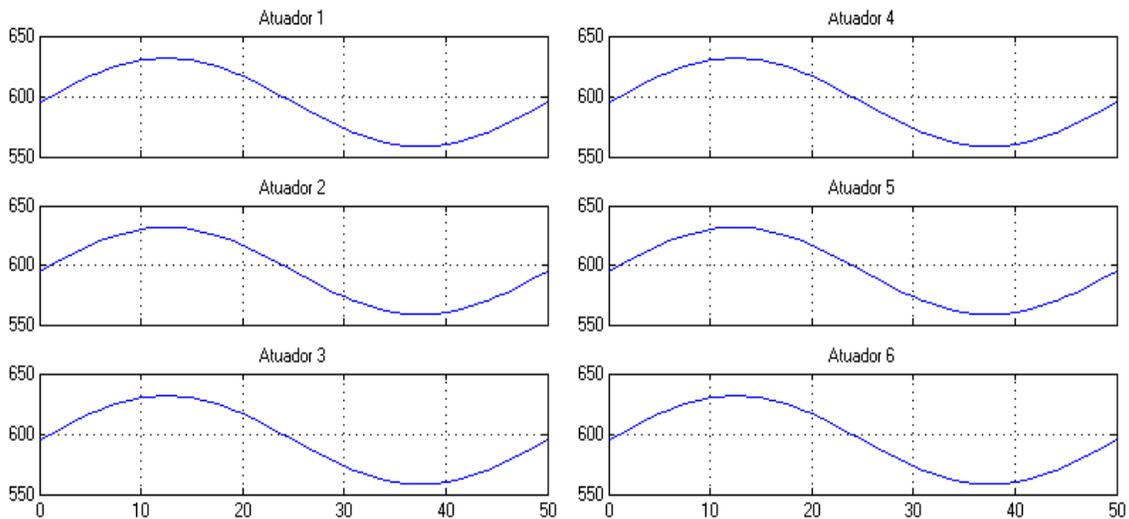


Figura 67: Trajetoria no espaço das juntas MPS PETROBRAS.

Mediante a avaliação do número de condição para a trajetória proposta, pode-se verificar que o manipulador não alcança uma configuração singular durante a execução de determinada trajetória (figura 68), devido ao fato que o número de condição não alcança nenhum valor significativamente alto na trajetória (numericamente tende a infinito).

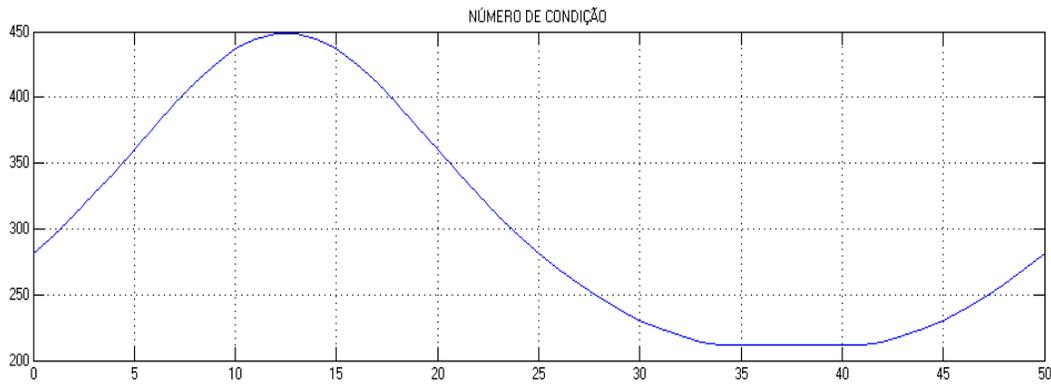


Figura 68: Número de condição MPS PETROBRAS.

Nesta aplicação também foi calculado o volume de trabalho, sendo útil para determinarmos as possíveis trajetórias no espaço de trabalho que poderiam ser executadas pelo MPS-PETROBRAS. As possíveis trajetórias a serem determinadas devem ter uma orientação constante em função do volume de trabalho constante calculado (figura 69).

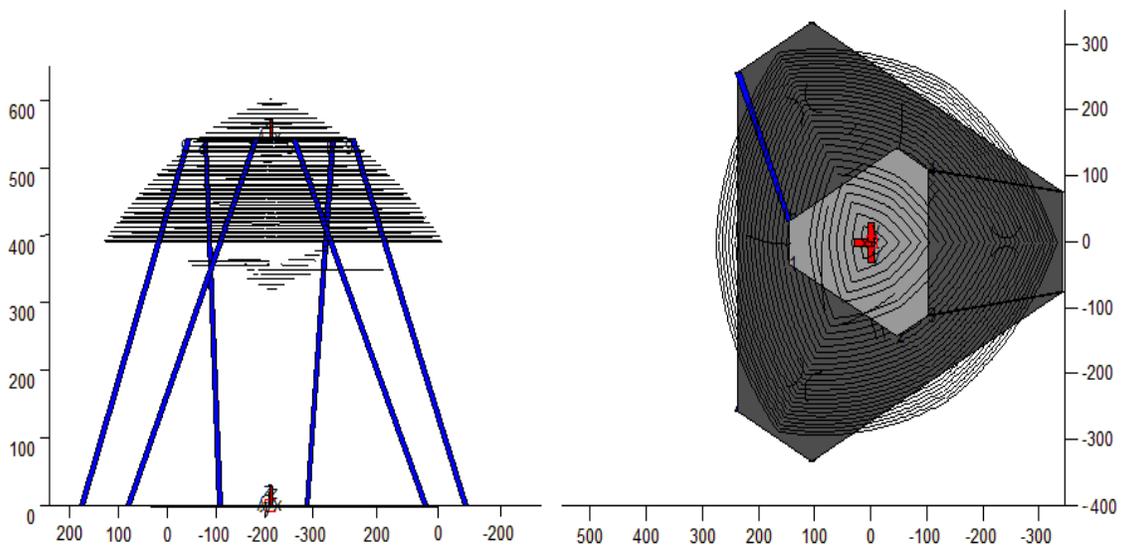


Figura 69: Volume de trabalho MPS PETROBRAS

Com base nos resultados do volume de trabalho pode-se determinar uma nova trajetória o espaço de trabalho a ser executada pelo MPS PETROBRAS. A nova trajetória proposta para o MPS não podera exceder os limites do volume de trabalho.

Neste caso, a metodologia utilizada para a análise cinemática do MPS permitiu a avaliação do rendimento cinemático de um novo protótipo de plataforma de Stewart, onde o calculo do volume de trabalho no espaço de operação do manipulador permitira o planejamento de novas trajetórias do manipulador em estudo. Mediante a verificação do número de condição na execução da trajetória, é possível verificar que o manipular não assuma nenhuma configuração singular, que poderia trazer problemas de posicionamento e controle de posição.

6.2 Caso II: Dispositivo Robótico para manipulação de ferramentas

O manipulador **FANUC - 200iB** é freqüentemente utilizado em aplicações que requerem alta rigidez e receptividade, que ocorrem em grande variedade de operações de manufatura e montagem automobilística, dentre elas podemos destacar: soldagem robotizada, carregamento de peças e remoção de materiais. Na figura 70 é apresentado o manipulador em estudo e tabela contendo os parâmetros geométricos obtidos a partir do manual de referencia técnico do mesmo (**FANUC Robotics, 2005**), que deverão ser utilizados para a modelagem cinemática do mesmo.



Figura 70: Manipulador Fanuc – 200ib.

Tabela 8: Parâmetros manipulador FANUC – 200ib

Parâmetro	Unidade	Valor
Raio da Plataforma [r_a]	mm	206
Ângulo da plataforma [ap]	graus	80
Raio da base [r_b]	mm	325
Ângulo da Base [ab]	Graus	20
Posição inicial no eixo z	mm	800
Cumprimento máximo atuador [l_{max}]	mm	820
Cumprimento mínimo atuador [l_{min}]	mm	1250

Para validação do simulador em estudo, a tarefa a ser simulada é a soldagem de uma peça semicircular, realizada sobre um plano inclinado -20° no eixo x . Conseqüentemente, a trajetória da soldagem é realizada pela plataforma em estudo obedecendo à mesma inclinação. A distancia entre ponto fixo na plataforma e ponto na trajetória no espaço de trabalho é de 5mm.

A posição inicial do manipulador não corresponde com o sistema de referencia total W , a diferença do caso I apresentado anteriormente. O sistema de referencia do manipulador O está deslocado do sistema de referencia total W , por:

$$P_I = [0 \ 0 \ 830 \ 180 \ 0 \ 0]^T \quad (63)$$

Com o deslocamento de 830 mm no eixo z e rotação de 180° no eixo x , o manipulador fica invertido. Estas características são importantes para simularmos, as operações nas quais o manipulador é fixo no teto, como um dispositivo destinado a intervenções cirúrgicas ou para manipulação de peças.

A partir da animação gráfica da trajetória apresentada na figura 71, podemos verificar a posição e orientação inicial de um MPS, com os parâmetros fornecidos anteriormente.

A trajetória desenvolvida no espaço de trabalho, correspondente à tarefa a ser simulada, utilizando os parâmetros mostrados na tabela 8. Estes dados foram utilizados como parâmetros de entrada do simulador para a execução da trajetória $\vec{P}(t)$. A trajetória é executada num plano inclinado 20° (figura 71), onde a posição angular é constante seguindo o ângulo de orientação γ . As unidades dos resultados apresentados estão em milímetros e segundos.

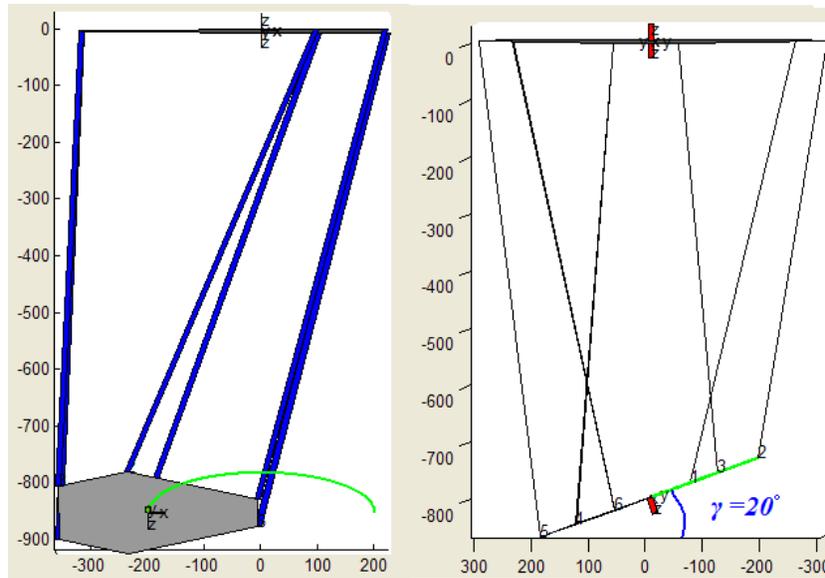


Figura 71: Animação Gráfica de movimentos de um MPS FANUC - 200iB

Tabela 9: Parâmetros da trajetória MPS FANUC -200iB

Parâmetro	Unidade	Valor
Raio da trajetória [r_a]	mm	200
Arco [$Arco$]	graus	180
z	mm	830
[dI]	mm	5

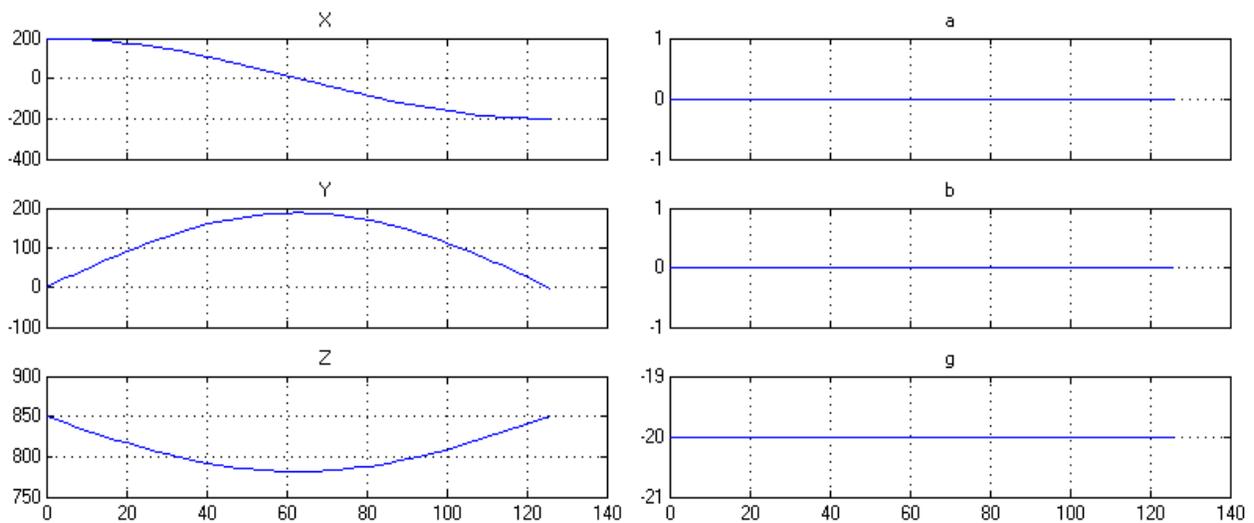


Figura 72: Trajetoria realizada no espaço de trabalho FANUC - 200iB.

As velocidades $\dot{\vec{P}}$, e acelerações $\ddot{\vec{P}}$ correspondentes à trajetória no espaço de trabalho são apresentadas na figura 73. Para esta trajetória as velocidades e acelerações angulares são zero, e por esta razão não são apresentadas graficamente. As unidades de medida utilizadas para as velocidades são em mm/s e para as acelerações em mm/s².

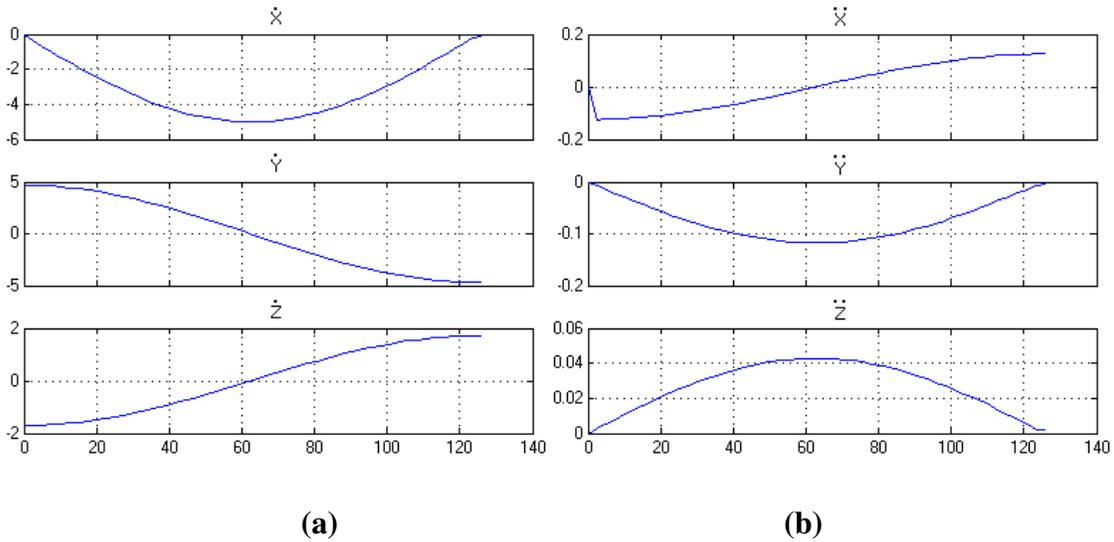


Figura 73: Velocidades e acelerações na trajetória MPS FANUC – 200 iB

Mediante a formulação do problema cinemático inverso foram encontrados os valores dos comprimentos dos atuadores em função da trajetória no espaço de trabalho $\vec{l}(t)$. Os comprimentos para cada atuador na execução da presente trajetória são apresentados graficamente na figura 74.

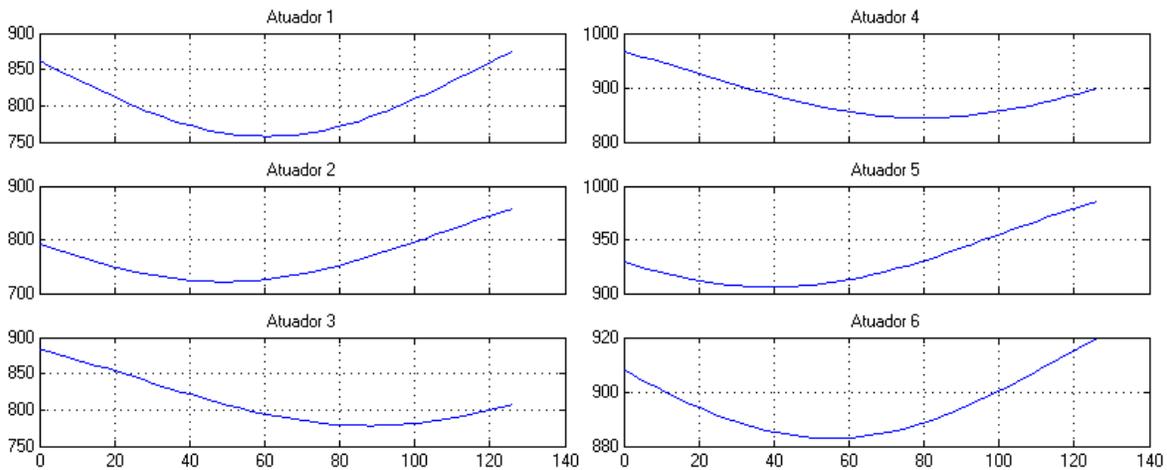


Figura 74: Trajetória no espaço das juntas, FANUC – 200 iB

A figura 75 apresenta o número de condição associado a evolução desta trajetória, onde podemos verificar que o manipulador não apresenta configurações singulares na execução da mesma. Os valores do número de condição permanecem constantes, isto é, eles variam muito pouco em relação ao valor da configuração inicial $\vec{P}(0)$.

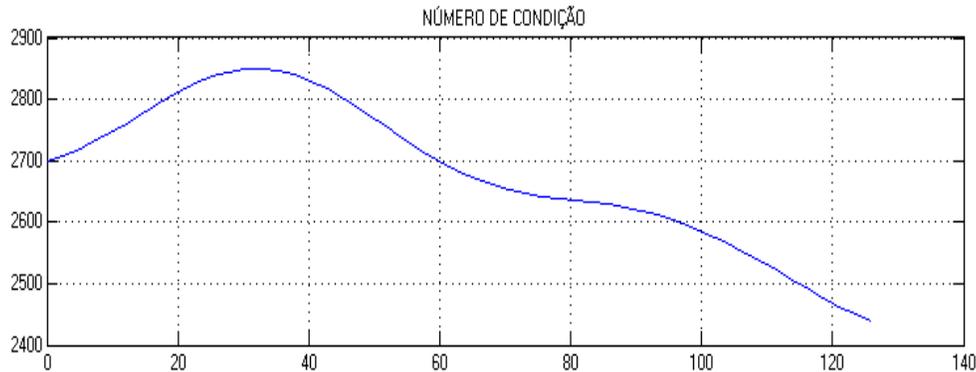


Figura 75: Número de condição FANUC -200 iB

No presente estudo foi simulada uma tarefa a ser executada pelo manipulador FANUC – 200 iB, permitindo assim a simulação desta tarefa e avaliação do desempenho cinemático deste manipulador. Neste caso não foi considerado a dinâmica do manipulador devido ao fato que no regime de trabalho delineado pelo fabricante para a realização de tarefas deste manipulador, o controle de posição foi calculado e implementado pelo fabricante, considerando os efeitos dinâmicos do mesmo.

6.3 Caso III: Controle no espaço das juntas.

Neste estudo de caso foi desenvolvida a análise cinemática para projetar o controle de posição no espaço das juntas. Inicialmente, foi definido o modelo geométrico e parâmetros associados, utilizando como referencia do MPS **AI-HEX-HR8** da **ALIO INDUSTRIES**. O sistema de acionamento utilizado foram atuadores lineares elétricos **MAXON RE 35**, cujos parâmetros utilizados são apresentados no **anexo IV** desse trabalho.

Para validação de nosso estudo foram definidas três trajetórias de trabalho, e para cada uma delas é projetado o sistema de controle no espaço das juntas e verificado a trajetória de saída, após o controle no espaço de trabalho.

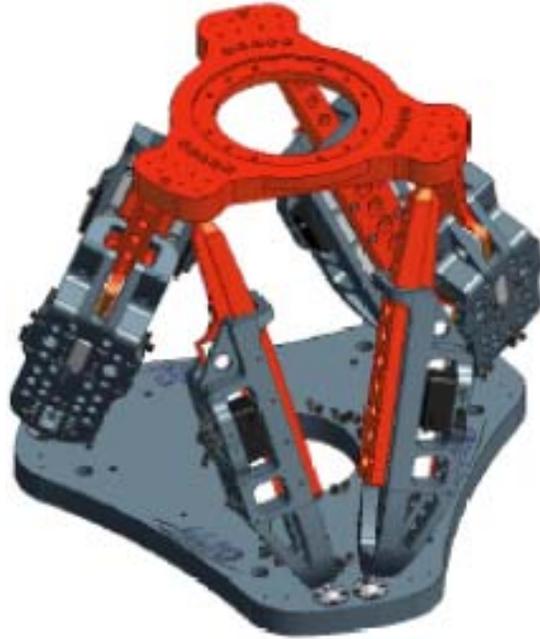


Figura 76: MPS AI-HEX-HR8 (ALIO INDUSTRIES).

6.3.1 Definição geométrica e cinemática

As tabelas 9, 10 e 11 apresentadas a seguir mostram respectivamente, os parâmetros geométricos e configuração de trajetórias do manipulador, os parâmetros dinâmicos correspondentes a massa e inércia do manipulador e parâmetros correspondentes ao atuador utilizado na tabela 11. A partir da utilização destes parâmetros no simulador a visualização de movimentos em função da modelagem cinemática é apresentada na figura 77.

Tabela 10: Parâmetros geométricos

Parâmetro	Unidade	Valor
Raio da Plataforma [r_a]	mm	155
Ângulo da plataforma [$101r$]	graus	100
Raio da base [r_b]	mm	178
Ângulo da Base [ab]	graus	20
Posição inicial no eixo z	mm	390

Tabela 11: Massas e inércias MPS

Parâmetro	Unidade	Valor
Massa plataforma [m_a]	Kg	3.35
Inércia plataforma respeito à X_a [I_x]	Kg m ²	0.03
Inércia plataforma respeito à Y_a [I_y]	Kg m ²	0.03
Inércia plataforma respeito à Z_a [I_z]	Kg m ²	0.06

Tabela 12: Parâmetros do atuador linear

Parâmetros	Unidade	Valor
Resistência na Armadura [R_a]	Ω	0.605
Indutância na Armadura [L_a]	mH	0.191
Constante de Torque [KT]	mNm/A	0.292
Constante de velocidade [KN]	v/(rad/s)	34.34
Atrito viscoso motor [B_m]	Nm	5.6
Inércia do Rotor [J_m]	Kgmm ²	7.87
Passo parafuso [PT]	mm	1
Sensor posição [k_e]	v/mm	0.12
Redutor planetário [N]	-	1/51
Conversor força –torque [D]	mm	6.02×10^{-3}

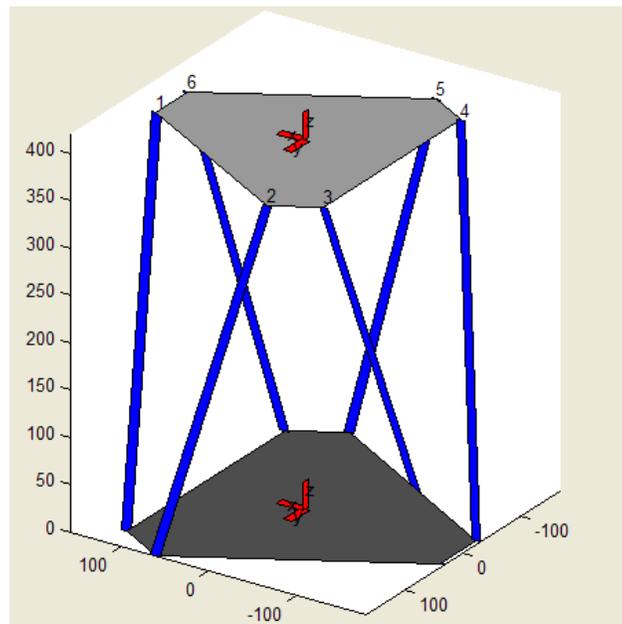


Figura 77: Modelo Geométrico MPS – AI-HEX-HR8

6.3.2 Tarefa I

A primeira trajetória a ser considerada, é um movimento de translação da base. Neste caso, realizaremos uma trajetória circular definida através dos parâmetros apresentados na tabela 12, onde a orientação na plataforma móvel é constante.

Tabela 13: Parâmetros trajetória circular – TAREFA I

Parâmetro	Unidade	Valor
Raio da trajetória [r_a]	mm	50
Arco [$Arco$]	graus	360
Z	mm	390
[dl]	mm	2

A animação correspondente a simulação de movimentos correspondente a tarefa I, é apresentada na figura 78, e a trajetória dessa tarefa no espaço de trabalho na figura 78. Da mesma maneira são apresentadas a velocidades e acelerações para esta trajetória na figura 80. Somente foram apresentadas nas velocidades e acelerações em x - y - z , já que a orientação é constante.

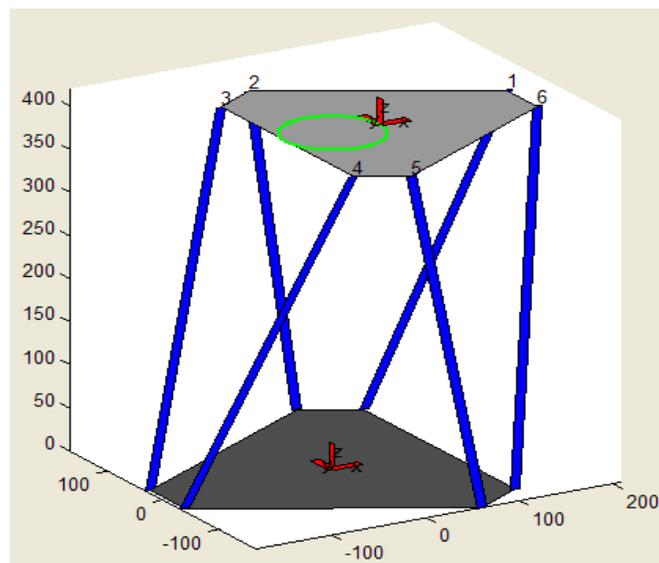


Figura 78: Animação do movimento para a trajetória de referencia $\vec{P}(t)$ - tarefa I

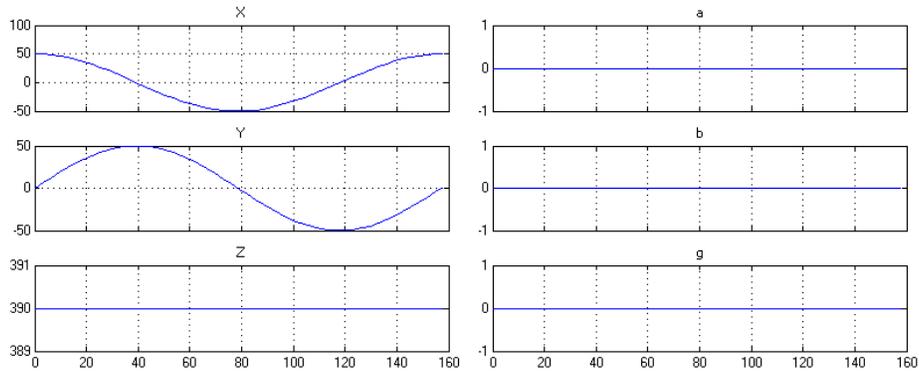


Figura 79: Trajetória no espaço de trabalho $\vec{P}(t)$ - tarefa I

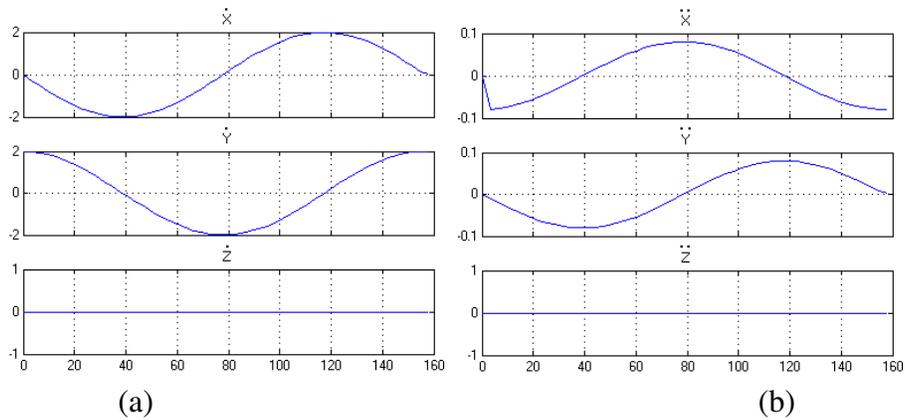


Figura 80: Velocidades $\dot{\vec{P}}(t)$, e acelerações $\ddot{\vec{P}}(t)$ - tarefa I

O controle de posição no espaço das juntas é importante na avaliação do número de condição, permitindo assim, evitarmos configurações singulares (figura 81), considerando que estas configurações não são desejáveis no controle de posição. Neste caso o número de condição para todos os instantes de tempo não aumenta significativamente respeito ao valor em $\vec{P}(0)$. Devido a isto se pode afirmar que o manipulador não poderá atingir uma configuração singular.

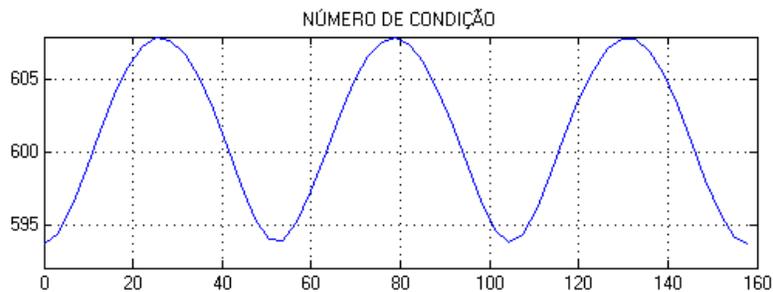


Figura 81: Número condição - tarefa I

Os valores dos ganhos do controlador PID utilizados foram calculados a partir do método de Routh-Hurwitz, apresentados na tabela 13. A partir da trajetória de referencia no espaço de trabalho $\vec{P}(t)$, são encontrados os valores das trajetórias das juntas utilizando o modelo cinemático inverso. Na figura 82 são apresentados os resultados obtidos.

Na figura 83 são apresentadas as variáveis articulares $\partial \vec{l}(t)$ que são as trajetórias de referencia para cada atuador e a respectiva saída $\partial \vec{l}_d(t)$. Os resultados são apresentados desta maneira porque destes incrementos é achada a trajetória de saída $\vec{P}_o(t)$.

Tabela 14: Parâmetros controlador tarefa I

Parâmetro	Valor
Proporcional [Kp]	100
Integral [Ki]	1
Derivativo [Kd]	1

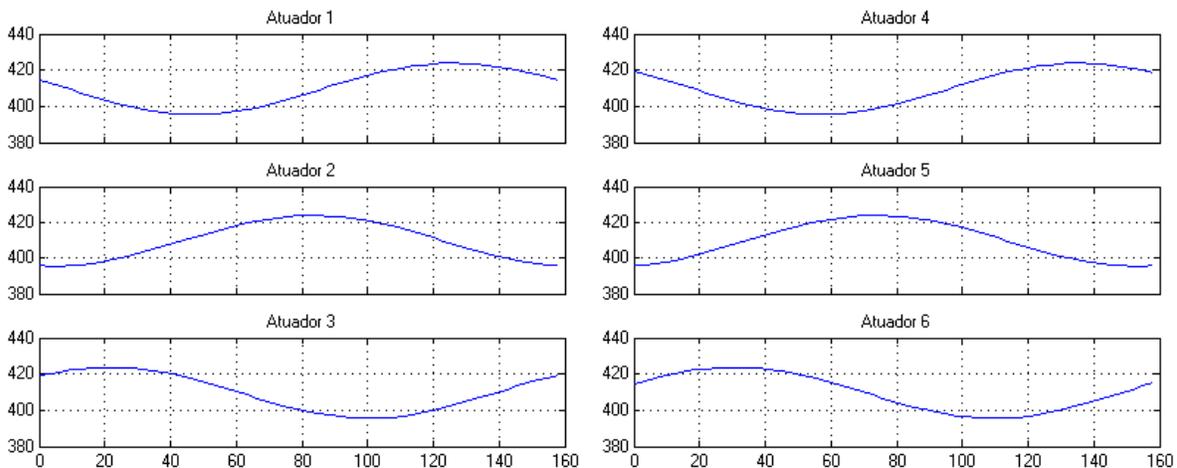


Figura 82: Trajetoria no espaço das juntas e saída controlada - TAREFA I

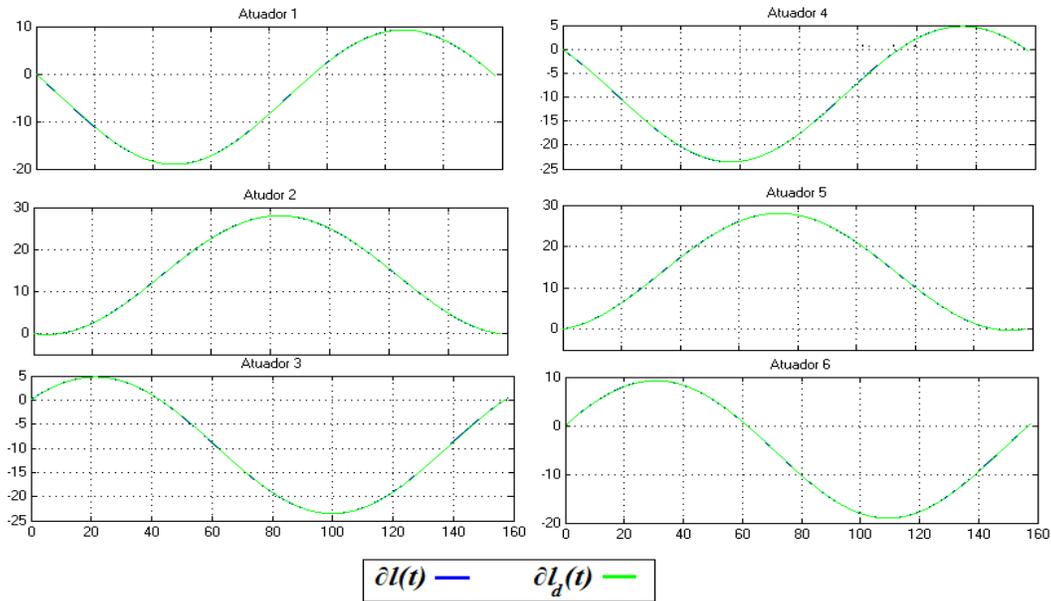


Figura 83: Referência $l(t)$ e saída $l_d(t)$ nas juntas – tarefa I

Para verificar a de saída no espaço de trabalho, é utilizado modelo direto mediante o calculo do jacobiano inverso. Na figura 84 são apresentados os resultados obtidos para a trajetória de referência $\vec{P}(t)$ e a trajetória de saída de pois do controle $\vec{P}_o(t)$.

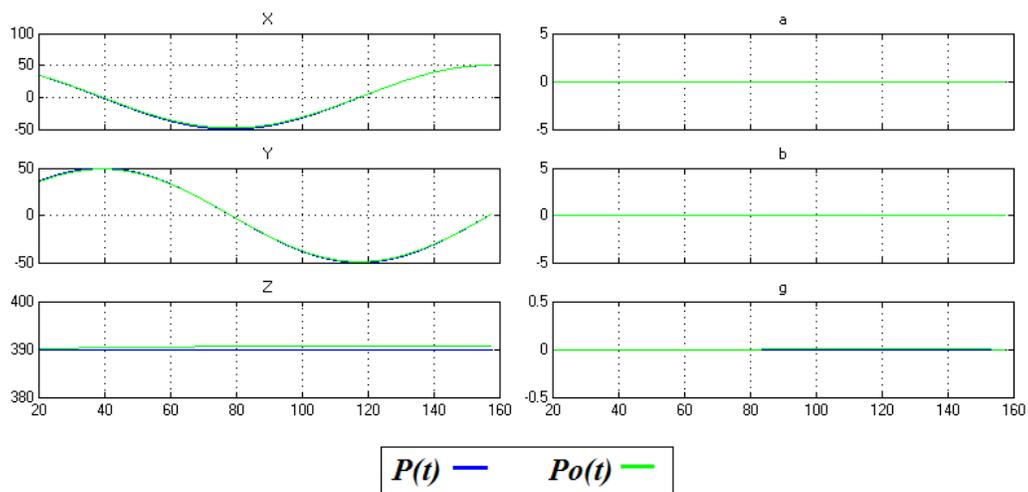


Figura 84: Trajetória de saída no espaço de trabalho $\vec{P}_o(t)$ – tarefa I.

Para esta trajetória podemos verificar que a velocidade e aceleração são pequenas, acarretando assim, que as forças originadas pela dinâmica do mecanismo na dinâmica direta são

também pequenas. Conseqüentemente, para calculo do controlador de posição, a utilização de somente um ganho proporcional seria suficiente para o controle no espaço das juntas (controlador proporcional), isto porque o torque de perturbação no motor $T_d(t)$ não é o suficientemente grande para tirar o comportamento linear do motor.

6.3.3 Tarefa II

A trajetória considerada nesta tarefa foi um movimento rotacional, não havendo variações na posição da plataforma móvel, somente na sua orientação. A trajetória a ser executada foi implementada a partir da equação (71) e apresentada na figura 85.

$$\vec{P}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 20 \sin \omega t \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \text{ para } 0 < t \leq 20 \text{ e } \vec{P}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 20 \sin \omega t \\ 0 \end{bmatrix}, \text{ para } 20 < t \leq 40 \quad (64)$$

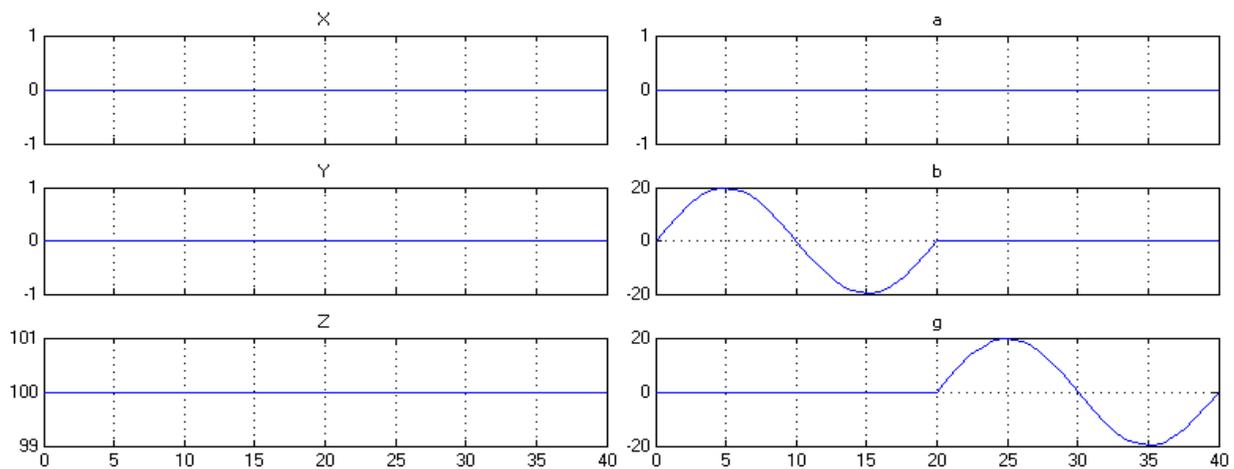


Figura 85: Trajetória no espaço de trabalho $\vec{P}(t)$ – tarefa II

As velocidades e acelerações da trajetória da trajetória atual são mostradas na figura 86.

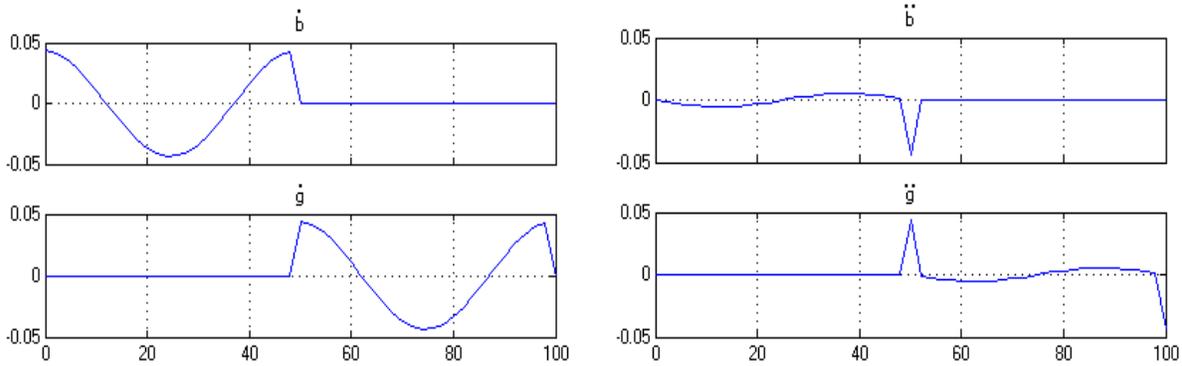


Figura 86: Velocidades $\dot{\vec{P}}(t)$, e acelerações $\ddot{\vec{P}}(t)$ - tarefa II

No projeto do sistema de controle no espaço das juntas, inicialmente é avaliado o número de condição durante a execução de uma determinada trajetória (figura 87), lembrando que para um número de condição que tende a infinito, a força de reação nos atuadores cresce, dificultando o controle no espaço das juntas.

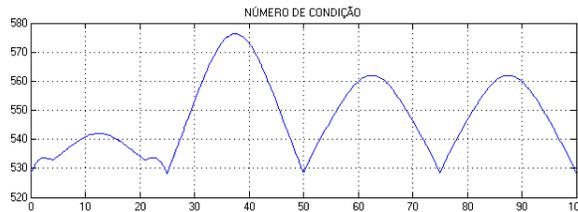


Figura 87: Número condição - tarefa II

Como no caso I, os valores dos ganhos do controlador PID utilizados foram calculados a partir do método de Routh-Hurwitz, apresentados na tabela 14. As trajetórias de referência para as juntas $\vec{l}(t)$ e saída no espaço das juntas $\vec{l}_d(t)$ são apresentadas na figura 88.

Tabela 15: Parâmetros do controlador tarefa II

Parâmetro	Valor
Proporcional [Kp]	100
Integral [Ki]	50
Derivativo [Kd]	10

A entrada das trajetórias de referencia no espaço de trabalho $\vec{P}(t)$ e saídas depois do controle no espaço de trabalho são apresentadas na figura 88.

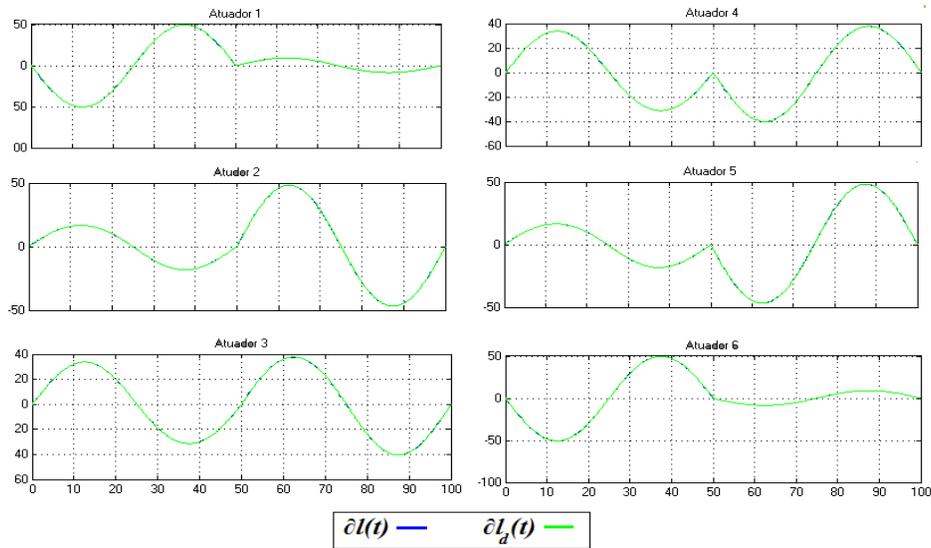


Figura 88: Referencia para as juntas $\partial \vec{l}$ e a saída nas juntas $\partial \vec{l}_d$ - tarefa II

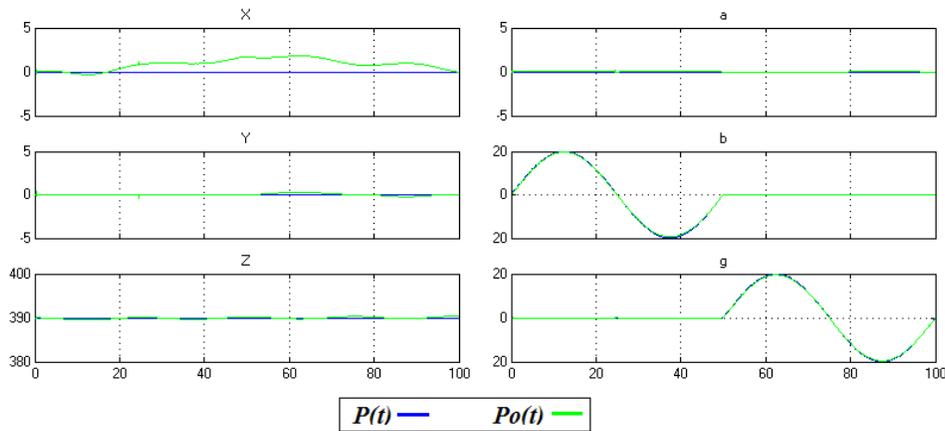


Figura 89: Referencia $\vec{P}(t)$ e saída $\vec{P}_0(t)$ no espaço de trabalho –tarefa II

Para a mesma trajetória executada no espaço de tarefas, mas aumentando a sua velocidade e a aceleração, podemos observar que os efeitos dinâmicos sofridos são maiores porque as forças e os torques são proporcionais as forças e acelerações. Na figura 90, podemos verificar que as velocidades e acelerações apresentam um aumento de quatro vezes em relação à análise anterior.

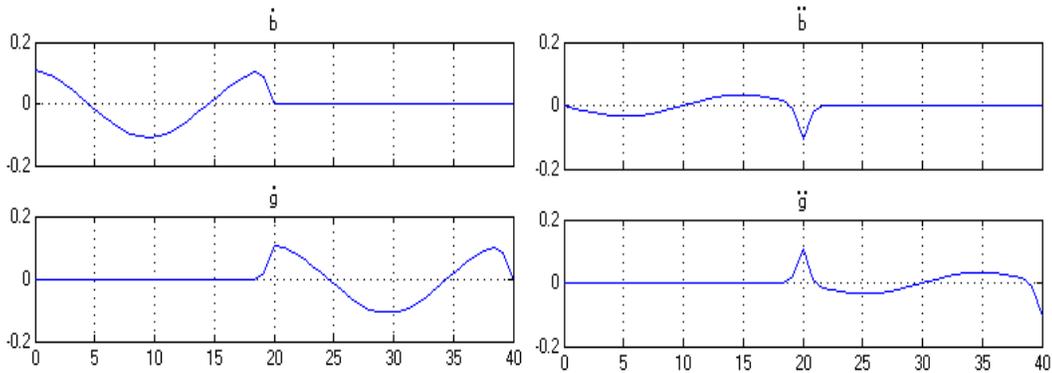


Figura 90: Velocidades $\vec{P}(t)$, e acelerações $\ddot{\vec{P}}(t)$ aumentados quatro vezes - tarefa II

Utilizando os mesmos ganhos do controlador do caso anterior, podemos constatar que os erros na posição da plataforma móvel aumentam (figura 91), e ainda que a posição de saída $\vec{P}_0(t)$ apresenta diferença maior respeito à posição de entrada especialmente em x e z como pode ser constatado na figura 91. Estes erros de posição podem ser diminuídos a partir do ajuste dos ganhos do controlador.

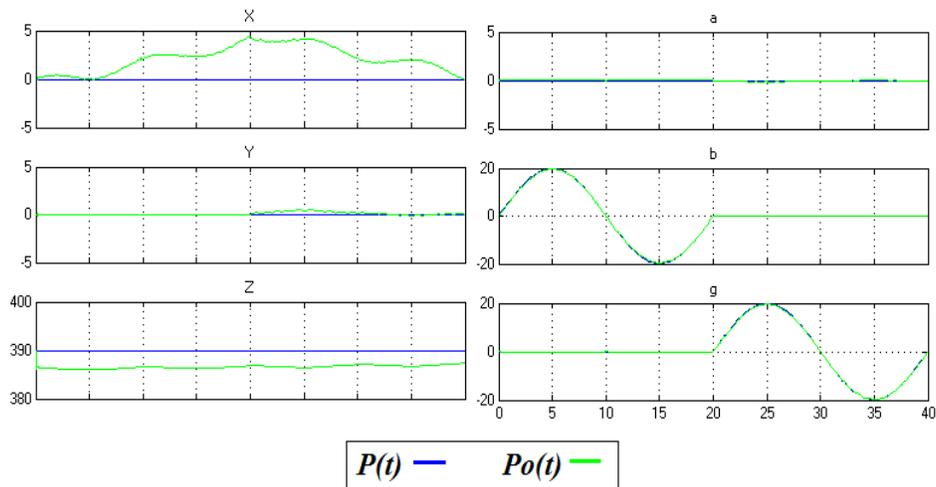


Figura 91: Referencia $\vec{P}(t)$ e saída $\vec{P}_0(t)$ no espaço de trabalho (tarefa II)

6.3.4 Tarefa III

Nesta ultima tarefa tem-se uma trajetória com movimentos de translação e rotação da plataforma móvel. Nesta trajetória mostrada na equação (72), os deslocamentos lineares e angulares estão dados em milímetros e graus respectivamente.

$$\vec{P}(t) = [50 \sin \omega t \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 70 \sin \omega t] \quad (65)$$

A partir da entrada dos parâmetros correspondente as trajetórias no simulador podem verificar a animação da execução gráfica desta trajetória (figura 92). Como nos casos anteriores, os ganhos do controlador foram calculados a partir do critério de Routh-Hurwitz (tabela 15).

Como nos casos anteriores é importante verificarmos o numero de condição para verificar que o manipulador não adote uma posição singular. Para esta tarefa o movimento de rotação no eixo z, α é de 70° , por esta razão o manipulador ao chegar a este valor se aproxima a uma configuração singular como se pode observado na figura 93. O número de condição aumenta de mais de seis vezes para esta configuração, e por isso pode-se afirmar que o manipulador está próximo de uma região singular.

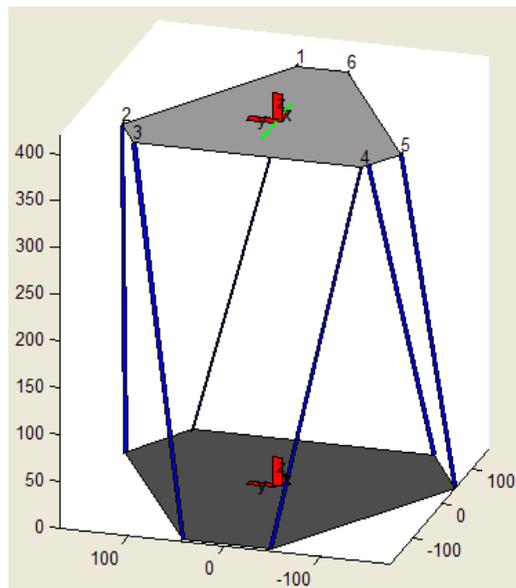


Figura 92: Animação do movimento para a trajetória de referencia $\vec{P}(t)$ - tarefa III

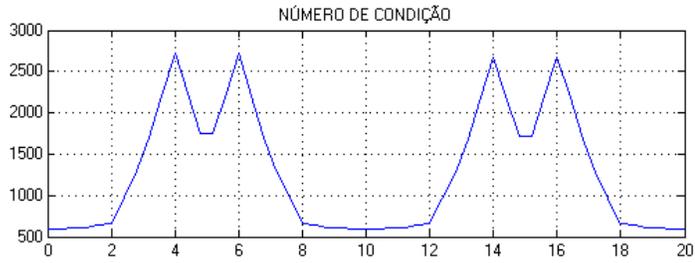


Figura 93: Avaliação do número condição na execução de uma trajetória - tarefa II

Tabela 16: Ganhos de controlador – tarefa III

Parâmetro	Valor
Proporcional [Kp]	400
Integral [Ki]	50
Derivativo [Kd]	10

Para a presente trajetória a distancia entre ponto e ponto é 2mm. Neste caso a entrada e saída no espaço de trabalho e das juntas está na figura 94.

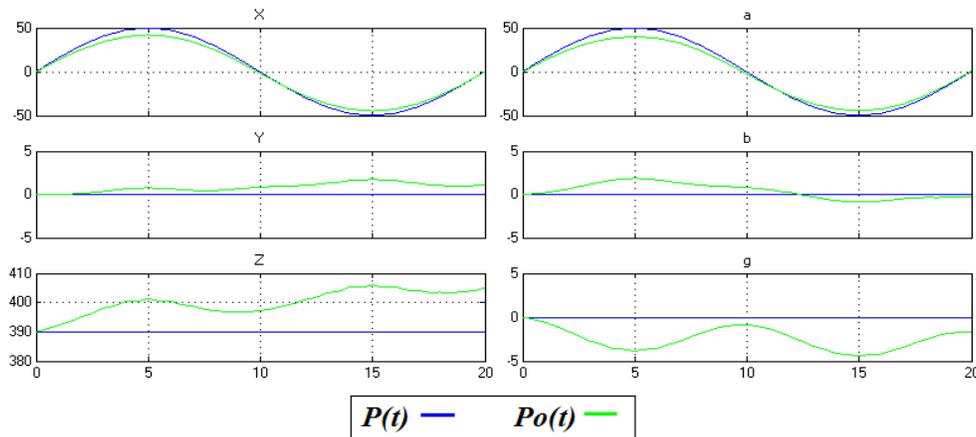


Figura 94: Referência $\vec{P}(t)$ e saída $\vec{P}_0(t)$ no espaço de trabalho – tarefa III

A partir da variação dos parâmetros do motor (aumentando a relação quatro vezes 1/200), e utilizando os mesmos ganhos no controlador, na figura 95 são apresentadas a respostas correspondentes no espaço de trabalho.

Neste caso, foi aumentado em quatro vezes o parâmetro N que divide o torque de perturbação de entrada, ou seja, $T_d(t)/N$, a diferença entre a trajetória de referência $\vec{P}(t)$ e saída $\vec{P}_o(t)$ no espaço de trabalho, não diminuiu por causa que da condição singular do manipulador na execução da trajetória (Figura 95). Nesta condição os efeitos do torque de perturbação $T_d(t)$ predominam sobre o comportamento do sistema, já que estes são elevador, considerando que as forças nos atuadores são proporcionais.

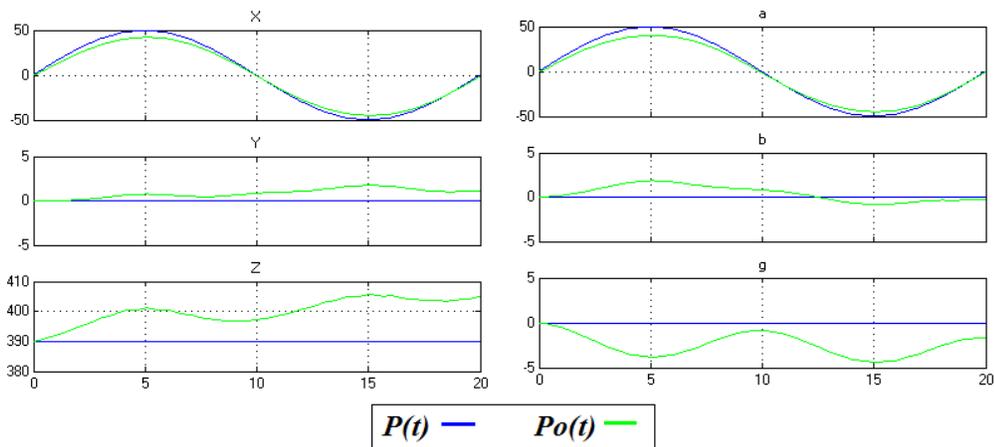


Figura 95: $\vec{P}(t)$ e $\vec{P}_o(t)$ com $N=200$ – tarefa III

Para os mesmos parâmetros do atuador, mas variando os ganhos do controlador como podem ser verificado na tabela 16, os resultados obtidos pode ser verificados na figura 96. Através desta simulação podemos observar o comportamento da resposta do manipulador a partir da variação dos ganhos do manipulador.

Tabela 17: Ganhos de controlador – tarefa III

Parâmetro	Valor
Proporcional [Kp]	100
Integral [Ki]	10
Derivativo [Kd]	10

Comparando estes resultados no espaço de trabalho com os resultados obtidos anteriormente vemos que não há variação. Isto se deve ao fato mencionado anteriormente, ou seja, o manipulador está trabalhando numa condição próxima a uma região singular, e neste caso

o controlador PID clássico não pode compensar os efeitos dinâmicos que originados pelas forças do mecanismo.

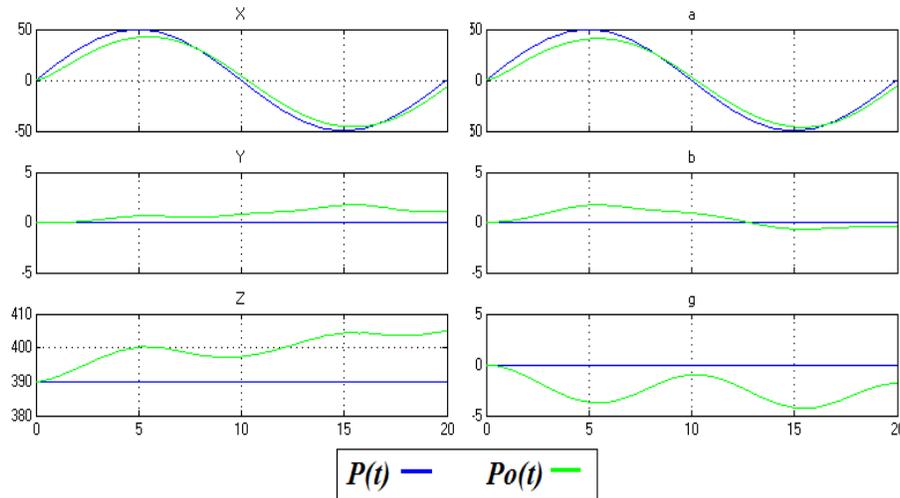


Figura 96: $\vec{P}(t)$ e $\vec{P}_0(t)$ a partir da variação dos ganhos de um PID – tarefa III

Finalmente, baseado nos resultados obtidos através das simulações realizadas para as três tarefas podemos constatar que a avaliação das singularidades é muito importante no controle de posição no espaço das juntas de um Manipulador Stewart. No caso de existência de configurações singulares, ainda que sejam alterados os parâmetros de projeto do manipulador e os ganhos do controlador, podemos constatar a dificuldade de compensar os erros de posição. A análise de singularidades é predominante no projeto do controlador em relação ao ajuste de seus ganhos e alteração dos parâmetros do sistema.

6.4 Considerações finais

Neste capítulo a ferramenta de simulação desenvolvida foi validada para um manipulador Plataforma Stewart a partir da implementação de três casos específicos utilizando a partir de aplicações reais os conceitos apresentados no capítulo 3, desta dissertação.

No primeiro caso pode-se comprovar o desempenho cinemático de um novo protótipo e planejar uma tarefa. Com esta finalidade, foi realizada a análise das singularidades, a determinação do volume de trabalho, as animações gráficas e numéricas que serviram na avaliação cinemática total do protótipo.

No segundo caso foi planejada uma tarefa para um manipulador existente. Mediante este estudo de caso foi verificado a versatilidade na análise da cinemática do manipulador Plataforma de Stewart.

No ultimo caso foi feito a análise e projetado do sistema de controle de posição no espaço das juntas de um manipulador Plataforma de Stewart. A partir da implementação de três trajetórias diferentes, e também variando os parâmetros de projeto do manipulador e os ganhos do controlador, foi estabelecida uma discussão sobre os resultados obtidos a partir desta simulação para as três tarefas, também todos os princípios teóricos propostos no modelo dinâmico e cinemático. Isto permitiu a validação, simulação e análise do simulador proposto para um manipulador Plataforma de Stewart.

Capítulo 7

Conclusões e Perspectivas futuras

O manipulador Plataforma de Stewart é um dispositivo mecânico que, em virtude das suas características geométricas e cinemáticas, tem se constituído em solução utilizada em diversos problemas de posicionamento de alto rendimento como foi visto no capítulo 3 desse trabalho. O crescente interesse de continuar solucionando diferentes problemas aplicando a Plataforma de Stewart tem motivado à aplicação de metodologias de projeto que permitam desenvolver protótipos deste manipulador para aplicações específicas.

Esta dissertação de mestrado é uma resposta à necessidade de estruturar o conhecimento desse mecanismo enfatizando os diferentes enfoques de concepção, projeto e aplicação de um manipulador Plataforma de Stewart, direcionando a implementação de um simulador de movimentos para concepção e análise cinemática e projeto do sistema de controle de posição, fornecendo uma visão geral que permitira analisar e simular integralmente um novo protótipo.

A metodologia de projeto apresentada no simulador desenvolvido apresenta uma visão global do projeto, envolvendo os aspectos determinantes no desenvolvimento de novos protótipos, relacionados principalmente às características cinemáticas e dinâmicas.

No projeto de um manipulador paralelo o modelo dinâmico está relacionado com a concepção cinemática, correspondendo a equações fortemente acopladas. A configuração cinemática e a determinação das tarefas no volume de trabalho influem no desempenho dinâmico do manipulador.

O ambiente de simulação a diferencia dos trabalhos desenvolvidos permite a modificação para incorporar novos aspectos de interesse para analisar o manipulador plataforma de Stewart e avaliar novas técnicas do controle, esta arquitetura é aberta e propicia para melhoras e modificações.

Para continuidade desse trabalho de pesquisa, sugere-se o desenvolvimento dos seguintes passos:

- Aplicar e desenvolver técnicas de controle que permitam compensar os efeitos não lineares dinâmicos de um manipulador Plataforma de Stewart , através da implementação de um sistema de controle no espaço de trabalho. Dentre estas estratégias do controle poderiam ser estudadas as propostas realizadas **Dumur (2007)** enfatizando a implementação de estratégias de controladores preditivos, que se mostra interessante em relação a outras estratégias de controle encontradas na literatura.
- Otimização dos parâmetros geométricos do manipulador. Para a realização de tarefas específicas no espaço de trabalho, mediante a utilização de um processo de otimização, torna-se possível encontrar os melhores parâmetros geométricos correspondentes à geometria do manipulador, permitindo assim, a obtenção de um desempenho cinemático ótimo na execução da tarefa. **Zhang (2006)** propõe uma otimização cinemática semelhante mediante uso de um algoritmo genético.
- Implementação experimental de protótipos de Manipulador Paralelo de Stewart invertido para posicionamento de dispositivos mecânicos (3 GL), e para simulação de movimentos (6 GL), utilizando a ferramenta de simulação implementada para prototipagem rápida do sistema de controle.

C.Gosselin; Lavoie, E. & Toutant, P. (1992), 'An efficient algorithm for the graphical representation of the threedimensional workspace of parallel manipulators'Proceeding of the 22nd ASME Mechanisms Conference', 323-328.

Cappel, K. (1967), 'Motion simulator', *Patent No. 3,295,224* , US Patent No. 3,295,224.

Chung, C. A.PRESS, C., ed. (2004), *SIMULATION MODELING HANDBOOK Apractical Approaches*.

Corke, P. I. (1996), 'A Robotics Toolbox for MATLAB'IEEE Robotics and Automation Magazine', 24-32.

Dasgupta, B. & Mruthyunjaya, T. (1998), 'Newton-Euler formulation for the inverse dynamics of the Stewart platform manipulator', *Mechanism and Machine Theory* **33**(8), 135-1152.

Dasgupta, B. & Mruthyunjayab, T. (1998), 'Singularity-Free Path Planning for the Stewart Platform Manipulator', *Mechanic Machine Theory* **33**, 711-725.

Dasgupta, B. & Mruthyunjayab, T. (1998), 'The Stewart platform manipulator: a review', *Mechanism and Machine Theory, PERGAMON Mechanism and Machine Theory* **35** (2000) **15±40**, 26.

Davliakos, I. & Papadopoulos, E. (2007), 'Model-Based Position Tracking Control for a 6-dof Electrohydraulic Stewart Platform', *Mediterranean Conference of Control and Automation* **1**(10.1109/MED.2007.4433655), 1-6.

DUMUR, D.; DOBRE, S. & OLARU, S. (2007), 'Explicit predictive control laws with a nonlinear constraints handling mechanism', *IEEE EUROCON Conference – International Conference on "Computer as a tool"* 'IEEE EUROCON Conference – International Conference on "Computer as a tool"'.
on "Computer as a tool".

Falco, J. A., 'Simulation Tools for Collaborative Exploration of Hexapod Machine Capabilities and Applications'.

Fasse, E. & Gosselin, C. (1998), 'On the spatial impedance control of Gough-Stewart platforms'IEEE International Conference on Robotics and Automation', 1749-1754.

Filho, S. C. T. (2006), 'Modelagem e otimização de um Robô de Arquitetura Paralela para aplicações Industriais', Master's thesis, Escola Politecnica da Universidade de Sro Paulo.

G. Lebre, K. L. & Lewis, F. (1993), 'Dynamic Analysis and Control os Stewart Platform Manipulator', *Journal of Robotic Systems* **10**(5), 629-695.

Ghobakhloo, A.; Eghtesad, M. & Azadi, M. (2006), 'Position Control of a Stewart-Gough

Platform using Inverse dynamics Method with full dynamics', *International Workshop on Advanced Motion Control, AMC, v 2006, 9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control 1*, 50-55.

Gosselin, C. & Angeles, J. (1991), 'A global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators', *Journal of mechanical design* **3**(113), 220-226.

Gosselin, C.; Pierre, E. & Gagne, M. (1996), 'On the development of the Agile Eye', *Robotics & Automation Magazine, IEEE* **3**(4), 29 - 37.

Gosselin, C. M.; Perreault, L. & Vaillancourt, C. (1999), 'Simulation and Computer-Aided Kinematic Design of Tree-Degree-of-Freedom Spherical Parallel Manipulators', *Journal of Robotic Systems* **12**(12), 857-869.

Gough, V.E. & Whitehall, S. (1962), 'Universal tyre test machine', *Proceedings of the FISITA Ninth International Technical Congress*, 117-137.

Guo, H. B. & Li, H. R. (2006), 'Dynamic analysis and simulation of a six degree of freedom Stewart platform manipulator', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C, Journal of Mechanical Engineering Science* **220**(1), 61-72.

Gwinnett, J. (1931), 'US Patent No. 1,789,680', Amusement devices.

Hunt, K. (1978), 'Kinematic geometry of mechanisms', *Clarendon Press*.

Ji, Z. (1993), 'Study of the Effect of Leg Inertia in Stewart Platforms', *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* **1**(1050-472919), 121-126.

Kang, J.; Kim, D. & Lee, K. (1996), 'Robust Tracking Control of Stewart Platform', *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control* **3**, 2355-3592.

Kim, D.; Chung, W. & Youm, Y. (1998), 'Analytic Singularity Expression for 6-DOF Stewart Platform-Type Parallel Manipulators' Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems Victoria, B.C., Canada October 1998', 1015-1020.

Kim, D. I.; Chung, W. K. & Youm, Y. (1997), 'Geometrical Approach for the Workspace of 6-DOF Parallel Manipulators' Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation', 2986-2991.

Lewis, F. L.; Dawson, D. & Abdallah, C. BASEL, N. Y. •., ed. (2004), *Robot Manipulator Control Theory and Practice*, MARCEL DEKKER, INC..

Li, D. & Salcudean, S. E. (1997), 'Modeling, Simulation, and Control of a Hydraulic Stewart Platform', *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation* **4**, 3360-3366.

Li, Y.; Wang, J. & Wang, L. (2002), 'STIFFNESS ANALYSIS OF A STEWART PLATFORM-BASED PARALLEL KINEMATIC MACHINE'Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics Br Automation', Washington, DC, 3672 - 3677.

Liu, M.; Li, C. & Li, C. (2000), 'Dynamics Analysis of the Gough–Stewart Platform Manipulator', *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **16**(1), 94-98.

MacCallion, H. e. D. P. (1979), 'The analisys of six degrees of freedom work and station for mechanized assembly', *5th Congress on theory of machines and mechanisms*, 616.

Nabat, V.; Pierrot, F.; Mijangos, M. R.; Arteche, J. A.; Zabalo, R. B.; Company, O. & de Armentia, K. F. P. (2006), 'Unlimited-rotation parallel robot with four degrees of freedom', Technical report, Demande de brevet internationale No. WO/2006/106165.

Nadimi, E. S.; Bak, T. & Izadi-Zamanabadi, R. (2006), 'Model Predictive Controller Combined with LQG Controller and Velocity Feedback to Control the Stewart Platform', *Advanced Motion Control, 2006. 9th IEEE International Workshop* **1**(0.1109/AMC.2006.1631630), 44-49.

Nguyen, C.; Antrazit, S.; Zhout, Z. & C.E. Campbell, J. (1991), 'Experimental Study of Motion Control and Trayectory Planning for a Stewart Platform Robot Manipulator', *IEEE International Conference on Robotics and Automation* **2**, 1873-1878.

Pashkevich, A.; Chablat, D. & Wenger, P. (2006), 'Kinematics and workspace analysis of a three-axis parallel manipulator: the Orthoglide', *Robotica, Cambridge University Press* **24**, 39 - 49.

Perng, M. & Hsiao, L. (1999), 'Inverse Kinematic Solutions for a Fully Parallel Robot with Singularity Robustness', *The International Journal of Robotics Research* **18**, 575-583.

Remillard, V. & Boukas, E. (2007), 'Gough-Stewart Platform Control: A Fuzzy control approach.', *Fuzzy Information Processing Society, 2006. NAFIPS 2006. Annual meeting of the North American* **1**, 108 - 113.

Rosario, J.; Dumur, D. & Machado., J. A. T. (2006), 'Control of 6 DOF Parallel Manipulator trough a Mechatronic Aproach.', *Jornal of Vibration and Control* **1**, 1-10.

Rosario, J.; Hermeni, H. A.; Moretti, M. & Dumur, D. (2007), 'Control of a 6 DOF Parallel Manipulator using Rapid Prototyping', *International Journal of Factory Automation, Robotics and Soft Computing* **2**, 147-154.

Rosario, J.; Lima, C. R. E. & Saramago, M. A. P. (2005), 'Implementação de arquitetura de Controle Reconfigurável aplicada a uma plataforma Stewart-Gough"VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente VII SBAI', 1-6.

Rosario, J.; Olivera, E. & Dumur, D. (2006), 'Conception of Stewart-Gough Platform with Reconfigurable Control using Itegrate Prototyping', *Second IEEE International Symposium on Power Electronics, Electronical Drivers, Automation and Motion - IEEE - SPEEDAM'2006* **10**, 13-18.

Rosario, J.; Saramago, M. A. P.; Olivera, E. & Dumur, D. (2007), 'A mechatronic Aproac to Control os Stewart-Gough Parallel Manipulator', *Proceedings of the XII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics XII DINAME* **1**, 1-6.

Sapio, V. D. (1998), 'Some Approaches for Modeling and Analysis of a Parallel Mechanism with Stewart Platform Architecture', Technical report, SANDIA REPORT.

SimulationX, I., '6-DOF Position-Controlled Hexapod Platform in 3D Mecahics', SIMULATION SOFTWARE ENGINEERING.

Stewart, D. (1965), 'A platform with six degrees of freedom', *Proceedings of the IMechE* **180**(15), 371-385.

Su, Y. X.; Duan, B. Y.; Zheng, C. H.; Zhang, Y. F.; Chen, G. D. & Mi, J. W. (2004), 'Disturbance-Rejection High-Precision Motion Control of a Stewart Platform'(3)'IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY'.

Sugahara, Y.; Ohta, A.; Hashimoto, K.; Sunazuka, H.; Kawase, M.; Tanaka, C.; Lim, H. & Takanishi, A. (2005), 'Walking Up and Down Stairs Carrying a Human by a Biped Locomotor with Parallel Mechanism', *Intelligent Robots and Systems International Conference on Volume*, 1489 - 1494.

Delf University of Technology. (2008), 'SIMONA'.

The MathWorks, I. (2008), 'SimMechanics™ 2 CAD Translator Guide', The MathWorks, Inc., <http://www.mathworks.com/>.

Tmg, Y.; Chen, Y.; Jar, H. & Kang, Y. (2004), 'Modeling and control for a Gough-Stewart platform CNC machine', *Journal of Robotic Systems* **21**(11), 609-623.

Tsai, L. (2000), 'Solving the Inverse Dynamics of a Stewart-Gough Manipulator by the Principle of Virtual Work', *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME* **122**(1), 3-9.

Tsai, L.1st, ed. (1999), *Robot Analysis, The mechanical os Serial and Parallel Manipulators*, A Willey-Interscience Publication.

Vianna, F. L. (2002), 'Análise Cinematica de um Simulador de movimentos de seis graus de liberdade com estrutura paralela', Master's thesis, Pontifícia universidade católica do rio de janeiro - PUC-RIO.

Wang, J.; Gosselin, C. & Cheng, L. (2002), 'Modeling and simulation of robotic systems with closed kinematic chains using the virtual spring approach', *Multibody System Dynamics* **7**(2), 145-170.

Wapler, M.; Urban, V.; Weisener, T.; Stallkamp, J.; Durr, M. & Hiller, A. (2003), 'A Stewart platform for precision surgery', *Transactions of the Institute of Measurement and Control* **25**(4), 329–334.

Wendlandt, J. M. & Sastry, S. S. (1994), 'Design and Control of a Simplified Stewart Platform for Endoscopy', *Proceedings of the 33rd conference on Decision and Control* **1**, 357-362.

W.P. Koevermans et al. (1975), 'Design and performance of the four dof motion system of the NLR research flight simulator', *Proc. of AGARD Conf., No 198, Flight Simulation* **17**, 1-11.

Yang, Y.; Rees, N. & Chuter, T. (2002), 'Reduction of encoder measurement errors in UKIRT telescope control system using a Kalman filter', *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **10**, 149 - 157.

Yoshikawa, T. (1985), 'Manipulability of Robotic Mechanisms', *Robotics Researc* **2**, 439-446.

You, K. S.; Lee, M. C.; Son, K. & Yoo, W. S. (2004), 'Sliding mode controller with sliding perturbation observer based on gain optimization using genetic algorithm"Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston. Massachusetts', 1958 - 1963.

Zhang, Yifeng; Yao, Y. S. (2006), 'Kinematic optimal design of 6-UPS parallel manipulator"2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2006', 2341-2345.

Zhang, Z. & Chen, T. (2007), 'Modeling and Movement Simulation of a Manipulator of 6-DOF Based on Stewart Platform with Pro/E"10th IEEE International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics', 533 - 536.

ANEXO I

DECOMPOSIÇÃO DE VALOR SINGULAR

A Decomposição de Valor singular é baseada na seguinte propriedade de diagonalização ordinária que pode ser imitada para matrizes retangulares: os valores absolutos dos valores próprios de uma matriz simétrica A . Se $Ax = \lambda x$ e $\|x\|=1$, então

$$\|Ax\| = \|\lambda x\| = |\lambda| \|x\| = |\lambda| \quad (66)$$

Si λ_1 é o valor próprio com maior magnitude, então um unidade correspondente de valor próprio v_1 . Isto é, a longitude de Ax é maximizada quando $x = v_1$, e $\|Av_1\| = |\lambda_1|$ pela equação 73. Esta é uma descrição de que v_1 e $|\lambda_1|$ têm uma analogia para matrizes retangulares que ajudara à decomposição de valor singular.

A1. Os valores singulares para uma Matriz $m \times n$

Para uma matriz A $m \times n$. Então $A^T A$ é simétrica e pode ser ortogonalmente diagonalizada. Sendo $\{v_1, \dots, v_n\}$ as bases ortonormais para R^n consistindo de valores próprios de $A^T A$, e Estando $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ associados aos valores próprios de $A^T A$. Então para $1 \leq i \leq n$,

$$\|Ax\|^2 = (Av_i)^T Av_i = v_i^T A v_i \quad (67)$$

$$\|Ax\|^2 = v_i^T (\lambda_i v_i) \quad (68)$$

$$\|Ax\|^2 = \lambda_i \quad (69)$$

Os valores próprios de $A^T A$ não são negativos. Pode-se assumir que os valores próprios estão arrumados da seguinte maneira:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \lambda_n \geq 0 \quad (70)$$

Os valores singulares de A são as raízes quadradas dos valores próprios de $A^T A$, denotados por $\sigma_1, \dots, \sigma_n$, os valores estão em ordem decrescente. Isto é $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$ para $1 \leq i \leq n$. Os valores singulares de A são as longitudes dos vetores Av_1, \dots, Av_n .

A2. Decomposição do valor singular

Para uma matriz A $m \times n$, com rank r , existe uma matriz diagonal $m \times n$ Σ , onde os elementos da diagonal da matriz D são os primeiros r valores singulares de A , $\sigma_1 \geq \sigma_2 \dots \geq \sigma_r \geq 0$, e existe uma matriz U ortonomal $m \times m$ e uma matriz V ortonomal $n \times n$, tal que

$$A = U \Sigma V^T \quad (71)$$

A matriz Σ é $m \times n$ diagonal, da forma:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (72)$$

Onde, $m - r$ são as colunas e $n - r$ são as filas. D é uma matriz diagonal $r \times r$ para um r que não exceda o menor valor de m e n . Si r é igual a m ou a n ou ambos, alguns ou todas as matrizes de zeros não apareceram.

A fatoração, $A = U \Sigma V^T$, com U e V ortogonais é chamada Decomposição de Valor Singular (SVD) de A . As matrizes U e V não são únicas, mas os elementos da diagonal de Σ são necessariamente valores singulares de A .

A3. Exemplo de aplicação

Achar a decomposição de valor singular para $A = \begin{bmatrix} 4 & 11 & 14 \\ 8 & 7 & -2 \end{bmatrix}$

$$A^T A = \begin{bmatrix} 4 & 8 \\ 11 & 7 \\ 14 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 & 11 & 14 \\ 8 & 7 & -2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 80 & 100 & 40 \\ 100 & 170 & 140 \\ 40 & 140 & 200 \end{bmatrix}$$

Os valores próprios de $A^T A$ são $\lambda_1 = 360$, $\lambda_2 = 90$, e $\lambda_3 = 0$. Os correspondentes vetores unitários dos vetores próprios são, respectivamente,

$$v_1 = \begin{bmatrix} 1/3 \\ 2/3 \\ 2/3 \end{bmatrix}, \quad v_2 = \begin{bmatrix} -2/3 \\ -1/3 \\ 2/3 \end{bmatrix}, \quad v_3 = \begin{bmatrix} 2/3 \\ -2/3 \\ 1/3 \end{bmatrix}$$

$$Av_1 = \begin{bmatrix} 4 & 11 & 14 \\ 8 & 7 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/3 \\ 2/3 \\ 2/3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 18 \\ 6 \end{bmatrix}$$

$$Av_2 = \begin{bmatrix} 4 & 11 & 14 \\ 8 & 7 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2/3 \\ -1/3 \\ 2/3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ -9 \end{bmatrix}$$

$$u_1 = \frac{1}{\sigma_1} Av_1 = \frac{1}{6\sqrt{10}} \begin{bmatrix} 18 \\ 6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3/\sqrt{10} \\ 1/\sqrt{10} \end{bmatrix}$$

$$u_2 = \frac{1}{\sigma_2} Av_2 = \frac{1}{3\sqrt{10}} \begin{bmatrix} 3 \\ -9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{10} \\ -3/\sqrt{10} \end{bmatrix}$$

Sendo $U = [u_1 \ u_2]$ e $V = [v_1 \ v_2 \ v_3]$ e

$$D = \begin{bmatrix} 6\sqrt{10} & 0 \\ 0 & 3\sqrt{10} \end{bmatrix}, \quad \Sigma = \begin{bmatrix} 6\sqrt{10} & 0 & 0 \\ 0 & 3\sqrt{10} & 0 \end{bmatrix}$$

Então,

$$A = \begin{bmatrix} 3/\sqrt{10} & 1/\sqrt{10} \\ 1/\sqrt{10} & -3/\sqrt{10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6\sqrt{10} & 0 & 0 \\ 0 & 3\sqrt{10} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/3 & 2/3 & 2/3 \\ -2/3 & -1/3 & 2/3 \\ 2/3 & -2/3 & 1/3 \end{bmatrix}$$

\uparrow \uparrow \uparrow
 U Σ V^T

A4. Número de condição

Para cálculos numéricos que envolvem uma equação $A\mathbf{x} = \mathbf{b}$, é possível aplicar DVS de A . As duas matrizes ortogonais U e V não afetam as longitudes ou ângulos dos vetores. Qualquer possível instabilidade no cálculo numérico é identificada em Σ . Se σ_r é o menor valor não singular de A , então o cociente σ_1 / σ_r é chamado número de condição de A . Este número é usado para estimar a sensibilidade a erros do cálculo da solução de $A\mathbf{x} = \mathbf{b}$.

A5. Exemplo de aplicação

Achar o número de condição da matriz $A = \begin{bmatrix} 4 & 11 & 14 \\ 8 & 7 & -2 \end{bmatrix}$.

Os valores singulares da matriz A são, $\sigma = [6\sqrt{10}, 3\sqrt{10}]$, o número de condição k , está dado por

$$k = \frac{\sigma_1}{\sigma_r} = \frac{6\sqrt{10}}{3\sqrt{10}} = 2$$

ANEXO II

CINEMÁTICA DOS CORPOS RÍGIDOS

Para a representação gráfica da animação do manipulador, é considerada a localização de um corpo rígido no espaço. Para identificar a localização de um corpo rígido, se estabelece um sistema de referencia. Este sistema de referência é chamado marco fixo. Serão usadas coordenadas cartesianas, ainda que outros tipos de coordenadas poderiam ser utilizados, dentre estes se encontram coordenadas cilíndricas e esféricas. A localização de um corpo rígido em relação ao sistema de coordenadas de referencia é conhecida se a posição de todos os pontos do corpo é conhecida. Se o corpo é rígido, seis parâmetros independentes são suficientes para descrever a localização no espaço 3 D.

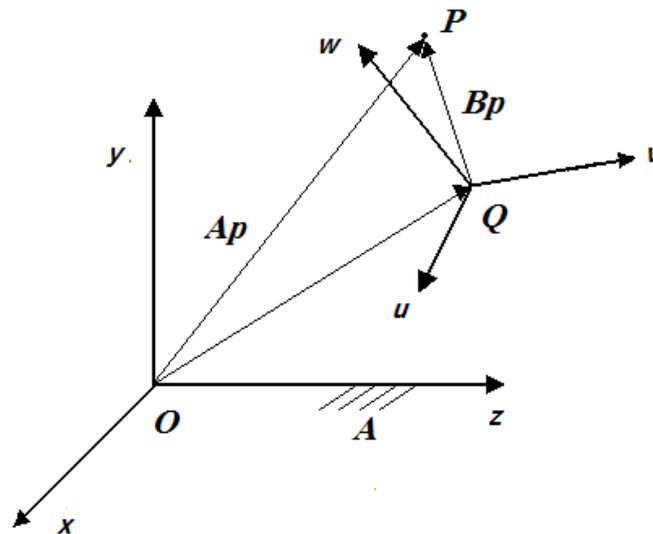


Figura 97: Localização de um corpo rígido

A figura 97 mostra a utilização de um sistema de coordenadas fixo (x,y,z) como referencia. Também é adicionado o sistema de coordenadas cartesiano (u,w,v) ao corpo móvel referenciado como sistema móvel. Podemos constatar que as posições de todos os pontos do corpo rígido podem ser determinadas quando a localização do corpo sistema móvel respeito ao sistema fixo é conhecida. Esta localização pode ser considerada como a composição de posição de um ponto, tomando desde a origem Q , e a orientação do sistema móvel respeito ao sistema fixo.

B1. Descrição da posição

A posição de um ponto respeito ao sistema de referencia pode ser descrito por um vetor de posição 3×1 . Por exemplo, a posição de P no sistema de referencia A mostrado na figura 98 é escrita como

$$\mathbf{p}^A = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (73)$$

Onde os subíndices x, y, z representam as projeções do vetor de posição nos três eixos do marco de referencia

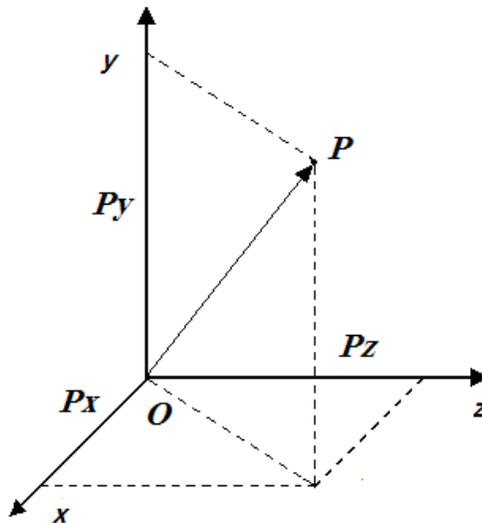


Figura 98: Vetor de posição em três eixos

B2. Descrição da orientação

A orientação de um corpo rígido em relação a um sistema fixo de referencia pode ser descrito de diferentes maneiras: cossenos diretores, eixo parafuso e ângulos de Euler. Para descrever a orientação de um corpo rígido, é considerado o movimento do sistema de referencia móvel B respeito ao sistema de referencia fixo A . Isto é conhecido como rotação ou movimento esférico. No presente trabalho a representação da orientação dos corpos rígidos é feita através da representação de ângulos de Euler.

A rotação é um movimento com três graus de liberdade, onde três parâmetros independentes são suficientes para descrever a orientação do corpo rígido no espaço. Varias representações com três parâmetros têm sido reportados na literatura. A representação mais utilizada é feita mediante os ângulos de Euler, onde a orientação do corpo rígido é descrita através de três rotações sucessivas nos eixos do sistema de coordenadas fixos ou móveis.

As matrizes de rotação básicas de rotação que representam os ângulos de Euler são apresentadas. Quando um corpo rígido realiza uma rotação de θ no eixo z . A matriz de rotação é:

$$R(z, \alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (74)$$

Quando o corpo rígido realiza uma rotação de ψ no eixo x . A matriz de rotação é:

$$R(x, \gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (75)$$

E quando o corpo rígido realiza uma rotação ϕ no eixo y . A matriz de rotação é:

$$R(y, \beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (76)$$

B3. Ângulos Roll – Pitch – Yaw

São consideradas rotações sucessivas do sistema de referencia B respeito ao sistema de referencia A . Começando por El sistema de referencia móvel B coincidindo com o sistema de

referencia fixo A , é rotado B no eixo x um ângulo γ , resultando no sistema (u', v', w') ; seguido pela segunda rotação de β no eixo y resultando no sistema (u'', v'', w'') ; e por ultimo a terceira rotação de α no eixo z , resultando no sistema final (u, v, w) .

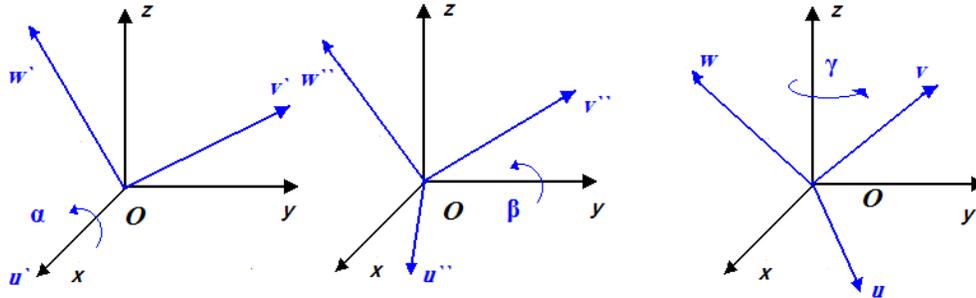


Figura 99: Rotações sucessivas nos eixos fixos

Desde que todas as rotações sejam feitas em relação ao sistema de coordenadas fixo, a matriz resultante de rotação é obtida através da multiplicação das três matrizes básicas de rotação (figura 99):

$$\underline{R}(\gamma, \beta, \alpha) = \underline{R}(z, \alpha)\underline{R}(y, \beta)\underline{R}(x, \gamma) \quad (77)$$

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \alpha & \cos \beta \sin \alpha \sin \gamma - \sin \beta \cos \gamma & \cos \beta \sin \alpha \cos \gamma + \sin \beta \sin \gamma \\ \sin \beta \cos \alpha & \sin \beta \sin \alpha \sin \gamma + \cos \beta \cos \gamma & \sin \beta \sin \alpha \cos \gamma + \cos \beta \sin \gamma \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (78)$$

Um movimento de rotação elementar no eixo x é designado *roll*, no eixo y *pitch*, no eixo z *yaw*. A convenção descrita é chamada representação de orientação *roll-pitch-yaw*. As rotações sucessivas não são realizadas no sistema de coordenadas fixo, nem comutativas e a ordem das rotações não pode ser mudada arbitrariamente.

B4. Descrição da localização

Como já foi mencionada anteriormente, a localização de um corpo rígido pode ser descrita pela posição da origem Q e a orientação do sistema móvel respeito ao sistema de referência fixo. A figura 97 mostra que a posição do ponto P do corpo rígido se pode expressar no sistema de referencia fixo A como $\mathbf{p}^A = \overline{OP}$. Também pode ser expressado no sistema de

referencia B como $\mathbf{p}^B = \overline{QP}$. Para derivar a relação entre \mathbf{p}^A e \mathbf{p}^B , o vetor \overline{QP} é a sua dos vetores:

$$\overline{OP} = \overline{OQ} + \overline{QP} \quad (79)$$

Onde $\overline{OQ} = \mathbf{q}^A$ denota a posição de Q respeito ao sistema de referencia A . A orientação do sistema de referencia móvel B respeito ao sistema de referencia fixo é definido pela matriz de orientação R_B^A . Entao a equação (86) pode ser escrita como:

$$\mathbf{p}^A = R_B^A \mathbf{p}^B + \mathbf{q}^A \quad (80)$$

A anterior equação descreve a posição de um ponto de um corpo rígido em términos da posição da origem Q e da orientação do sistema móvel B respeito ao sistema de referencia fixo A .

B5. Transformações homogêneas

A equação (87) relaciona a transformação geral de um vetor de posição de um sistema de referencia móvel em relação a um sistema de referencia fixo. O primeiro termo da direita da equação corresponde às contribuições devidas à rotação e o segundo termo às contribuições devidas à translação do sistema de referencia móvel respeito ao sistema de referencia fixo.

A matriz de transformação homogênea é uma matriz de 4x4 que é definida para o mapeamento homogêneo do vetor de posição de um sistema de um sistema coordenado em outro sistema. A matriz pode ser particionada em quatro sub-matrizes:

$$T_B^A = \begin{bmatrix} R_B^A(3 \times 3) & \vdots & \mathbf{q}^A \\ \dots & \vdots & \dots \\ \gamma(1 \times 3) & \vdots & \rho(1 \times 1) \end{bmatrix} \quad (81)$$

A matriz superior esquerda R_B^A denota a orientação do sistema de referencia móvel B respeito ao sistema de referencia A , a sub-matriz superior deita \mathbf{q}^A denota a posição da origem do sistema de referencia móvel B respeito ao sistema de fixo A , a sub-matriz inferior esquerda γ

representa a transformação da perspectiva e o elemento inferior direto ρ é o fator de escala. Para a cinemática dos mecanismos e dos manipuladores robóticos, o fator de escala de é 1 e a perspectiva é zero. Usando a matriz homogênea a equação (87) pode ser escrita de forma compacta da seguinte maneira:

$$\hat{\mathbf{p}}^A = T_B^A \hat{\mathbf{p}}^B \quad (82)$$

Onde,

$$T_B^A = \begin{bmatrix} R_B^A & \vdots & \mathbf{q}^A \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 \end{bmatrix} \quad (83)$$

$$\hat{\mathbf{p}}^A = [p_x \quad p_y \quad p_z \quad 1]^T \quad (84)$$

$$\hat{\mathbf{p}}^B = [p_u \quad p_v \quad p_w \quad 1]^T \quad (85)$$

Um exemplo de matriz de transformação homogênea para uma rotação simples no eixo z é dada por:

$$T_B^A(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (86)$$

Uma matriz de transformação para uma translação pura está dada por:

$$T_B^A(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & q_x \\ 0 & 1 & 0 & q_y \\ 0 & 0 & 1 & q_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (87)$$

B6. Gerador de trajetórias

O gerador de trajetória traça um caminho no espaço de trabalho a ser seguido pelo centróide da plataforma móvel do manipulador. O modelo cinemático inverso do manipulador é utilizado para encontrar os valores das variáveis articulares.

A trajetória é definida com os seguintes parâmetros: ponto inicial P_i , ponto final P_o , resolução linear δL e resolução angular $\delta\phi$. O gerador de trajetórias aborda duas classes de trajetórias: linear e circular. A figura 100 apresenta o diagrama do gerador de trajetória.

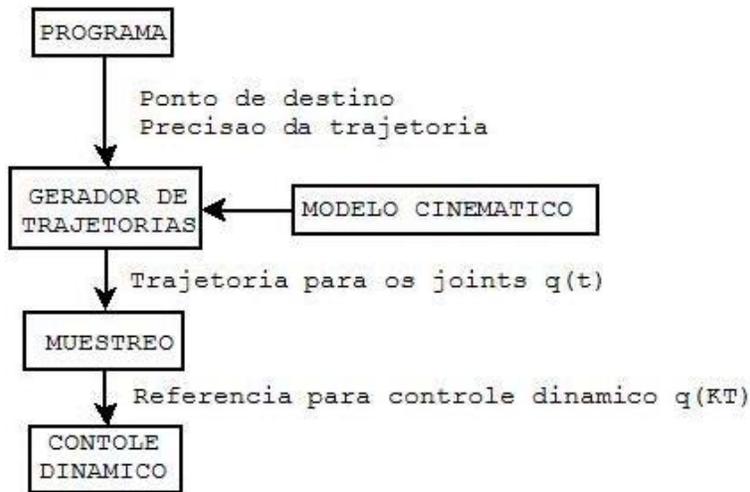


Figura 100: Gerador de Trajetórias do Manipulador

Cada uma das posições e orientações, que definem a trajetória P_n , estão definidos por:

$$P_n = P_{n-1} + \delta P \quad (88)$$

Onde,

P_n : posição atual

P_{n-1} : posição anterior

δP : variação na posição enunciada nas excreções

A variação δP é incrementada até P_n alcançar o ponto final P_o .

B7. Trajetória Linear

O pontos iniciais e finais da trajetória estão definidos por $P_i = [x_i \ y_i \ z_i \ \gamma_i \ \beta_i \ \alpha_i]$ e $P_o = [x_o \ y_o \ z_o \ \gamma_o \ \beta_o \ \alpha_o]$. O comprimento total da trajetória L será dado por:

$$L = \sqrt{(x_o - x_i)^2 + (y_o - y_i)^2 + (z_o - z_i)^2} \quad (89)$$

O número de pontos da trajetória, N_T é achado a partir da resolução linear δL

$$N_T = L/\delta L \quad (90)$$

Através do número de pontos da trajetória determinam-se cada uma das variações $\delta P = [\delta x \ \delta y \ \delta z \ \delta \gamma \ \delta \beta \ \delta \alpha]$, para a posição e orientação (figura 101).

$$\delta x = (x_o - x_i)/N_T \quad (91)$$

$$\delta y = (y_o - y_i)/N_T \quad (92)$$

$$\delta z = (z_o - z_i)/N_T \quad (93)$$

$$\delta \alpha = (\alpha_o - \alpha_i)/N_T \quad (94)$$

$$\delta \gamma = (\gamma_o - \gamma_i)/N_T \quad (95)$$

$$\delta \beta = (\beta_o - \beta_i)/N_T \quad (96)$$

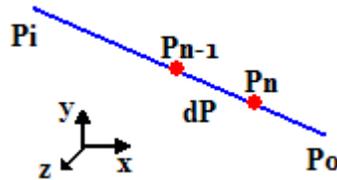


Figura 101: Trajetória linear

B8. Trajetória Circular

Os parâmetros para a trajetória circular são: radio curvatura r , ângulo do arco θ e ponto inicial P_i . A distancia total do arco L é:

$$L = r\theta \quad (97)$$

O número de pontos N_T da trajetória depende da resolução δL da trajetória no espaço de trabalho

$$N_T = L/\delta L \quad (98)$$

A trajetória circular é traçada no plano x - y do espaço de tarefas (figura 102), não há mudanças nem na orientação nem na posição no eixo z , as variações no espaço de tarefas são: $\delta P = [\delta x \ \delta y \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$. Onde,

$$\delta x = r \cos \delta\theta \quad (99)$$

$$\delta y = r \sin \delta\theta \quad (100)$$

$$\delta\theta = \theta/N_T \quad (101)$$

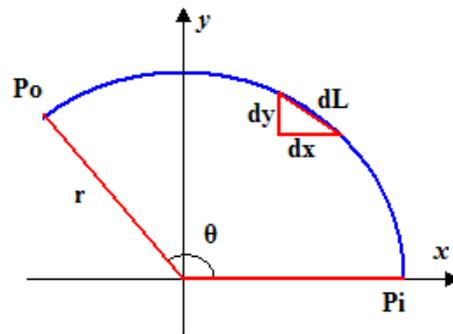


Figura 102: Trajetória Circular

ANEXO III

MANIPULADOR PARALELO - FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS

Neste anexo é desenvolvido a análise para o calculo das restrições do movimento 3D do MPS. Entre os aspectos analisados concernentes as limitações do movimento encontram-se: Detecção de colisões de pernas e avaliação de limites de avaliação de articulações passivas. Neste anexo é apresentado a interpolação para uma trajetória linear e circular, que são a base para a geração dos movimentos 3D

C1. Detecção de colisão entre as pernas.

Dependendo da configuração geométrica do MPS e a posição e orientação da plataforma móvel pode-se apresentar colisão entre as pernas extensíveis subsequentes. Devido a este motivo é apropriado analisar as colisões das pernas extensíveis figura (103).

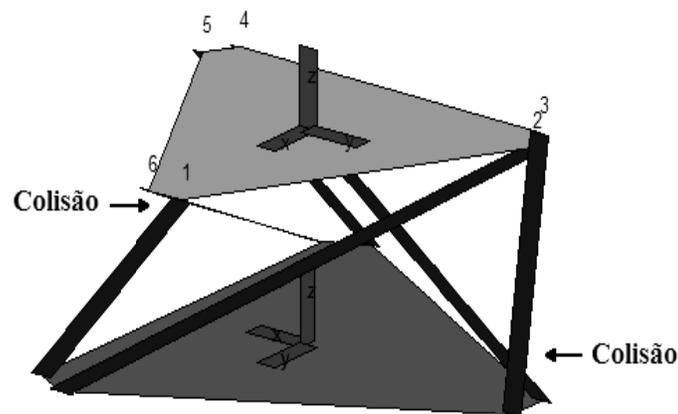


Figura 103: Configuração com colisão entre ligamentos

As pernas subsequentes a serem avaliadas para estabelecer colisões correspondem a perna $(2i-1)$ com perna $(2i-1) + 1$ e perna $(2i-1)$ com perna $(2i-1)-1$ para $i = 1,2,3,4,5,6$. Computacionalmente cada perna extensível pode ser apresentada como uma linha mediante a equação vetorial da reta r

$$r: X = A + \lambda \vec{v} \quad (102)$$

As pernas extensíveis, i e $i+1$, representam-se pelas seguintes equações:

$$X_i = B_i + \lambda_1(\vec{u}), \quad \vec{u} = \overrightarrow{A_i B_i} \quad (103)$$

$$X_{i+1} = B_{i+1} + \lambda_2(\vec{v}), \quad \vec{v} = \overrightarrow{B_{i+1} A_{i+1}} \quad (104)$$

As colisões se apresentam no médio das pernas, neste caso os valores de λ_1 e λ_2 estão entre 0 e 1. Por causa da configuração geométrica do MPS nunca se apresentam colisões nos extremos das pernas: $B_i, B_{i+1}, A_i, A_{i+1}$. Ao encontrar a distancia entre os dois ligamentos podem-se apresentar os seguintes casos:

Pernas linearmente dependentes (figura 104), neste caso $\|\vec{u} \times \vec{v}\| = 0$. Dado os ponto B_i e a reta X_{i+1} , a distancia $d(B_i, X_{i+1})$ está dada por:

$$d(B_i, X_{i+1}) = \frac{\|\overrightarrow{B_i B_{i+1}} \times \vec{v}\|}{\|\vec{v}\|} \quad (105)$$

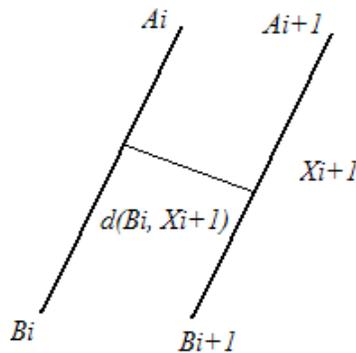


Figura 104: Ligamentos Paralelos

Pernas linearmente independentes, neste caso $\|\vec{u} \times \vec{v}\| \sim 0$. A distancia entre as duas linhas X_i e X_{i+1} está definida por:

$$d(X_i, X_{i+1}) = \frac{|\overrightarrow{B_i B_{i+1}} \cdot \vec{u} \times \vec{v}|}{\|\vec{u} \times \vec{v}\|} \quad (106)$$

Se as Pernas extensíveis são concorrentes (figura 105), lembrando que as linhas que representam as pernas são retas, a distancia entre as retas $d(X_i, X_{i+1}) = 0$. Para determinar que os pontos correspondentes à distancia mínima pertence às pernas são avaliados λ_1 e λ_2 para verificar que $0 \leq \lambda_i \leq 1$.

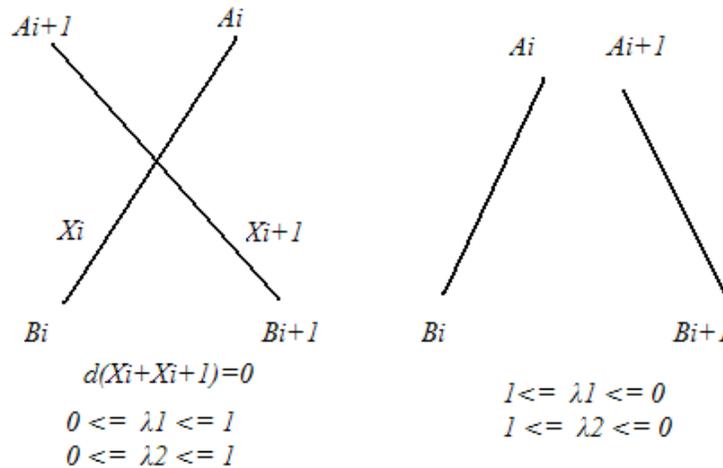


Figura 105: Ligamentos que se cruzam

Para qualquer dos casos se a distancia entre as duas pernas excede d_a radio das pernas extensíveis.

C.2 Calculo do limite das Articulações passivas

As articulações que ligam as pernas à base fixa podem ser universais ou esféricas. Para analise dos limites angulares, as articulações esféricas de três graus de liberdade podem ser tratadas como articulações universais de dois graus de liberdade devido a que o grau de liberdade a mais das articulações esféricas não é determinante no comportamento cinemático (TSAI, 1999).

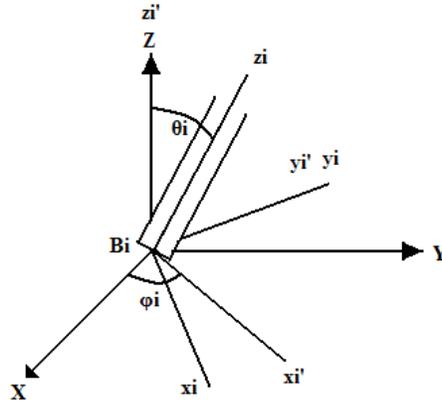


Figura 106: Ângulos de articulações passivas no atuador

Assumindo que cada perna é ligada à base fixa e móvel por articulações universais, estas não podem rotar sobre o eixo longitudinal, a orientação da perna i respeito à base fixa pode ser descrita por dois ângulos de Euler, o ângulo ϕ_i determina a rotação no eixo z_i resultando no sistema (x_i', y_i', z_i') seguido pela rotação de θ_i no eixo y_i como se mostra na figura 106 A matriz de rotação de cada perna está dada por:

$$R_i^A = R(\phi_i, z)R(\theta_i, y_i') = \begin{bmatrix} \cos \phi_i & -\sin \phi_i & 0 \\ \sin \phi_i & \cos \phi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & 0 & \sin \theta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_i & 0 & \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (107)$$

$$R_i^A = \begin{bmatrix} \cos \phi_i \cos \theta_i & -\sin \phi_i & \cos \phi_i \sin \theta_i \\ \sin \phi_i \cos \theta_i & \cos \phi_i & \sin \phi_i \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & 0 & \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (108)$$

O vetor unitário s_i no sistema de referencia B_i correspondente a cada perna esta dado por:

$$s_i^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (109)$$

Substituindo s_i^i em $s_i = R_i^A s_i^i$, tem-se:

$$s_i = \begin{bmatrix} \cos \phi_i \sin \theta_i \\ \sin \phi_i \cos \theta_i \\ \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (110)$$

Achando os valores para os ângulos θ_i e ϕ_i , tem-se:

$$\cos \theta_i = s_{iz} \quad (111)$$

$$\sin \theta_i = \sqrt{s_{ix}^2 + s_{iy}^2} \quad (112)$$

$$\sin \varphi_i = s_{iy} / \sin \theta_i \quad (113)$$

$$\cos \varphi_i = s_{ix} / \sin \theta_i \quad (114)$$

Na implementação pratica da Plataforma de Stewart o ângulo φ_i não tem nenhuma restrição devido a que esta articulação passiva pode girar livremente tanto na base fixa como na plataforma móvel sem restrição nenhuma. Para o analise foi considerada a articulação θ_i na base fixa e na plataforma móvel.

Na articulação θ_i da plataforma móvel, a analise é diferente porque ao mudar a orientação da plataforma, o ângulo da articulação θ_i muda porque a orientação tem que ser considerada no calculo da articulação. Na plataforma móvel tem-se:

$$s_i^{BA} = R_i^A R_A^B s_i^i \quad (115)$$

$$s_i^B = R_A^B s_i^i = \begin{bmatrix} \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (116)$$

Também se tem:

$$R_i^A = R(\phi_i, z) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & 0 & \sin \theta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_i & 0 & \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (117)$$

Desenvolvendo a expressão,

$$\begin{bmatrix} s_{ix}^{BA} \\ s_{iz}^{BA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{ix}^B \cos \theta_i & s_{iz}^B \sin \theta_i \\ s_{ix}^B \sin \theta_i & -s_{iz}^B \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (118)$$

O ângulo θ_i é achado resolvendo o sistema anteriormente pranteado.

ANEXO IV

MODELO DO ATUADOR

O atuador utilizado na simulação é um atuador linear da MAXON MOTOR. O atuador está composto de um motor cc, um redutor planetário, um parafuso e um encoder incremental (figura 107). O modelo de cada uma de estas partes será detalhado neste anexo.

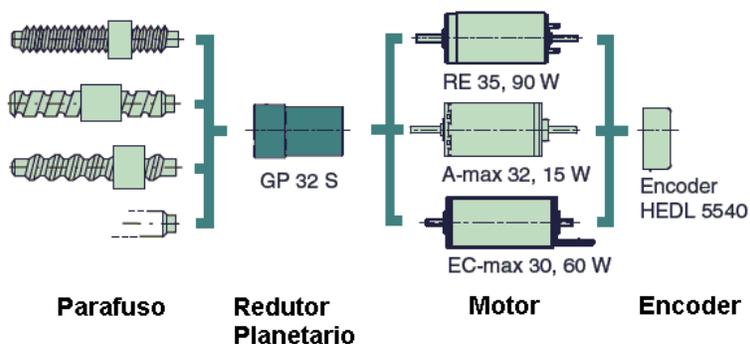


Figura 107: Componentes do atuador linear

O Motor utilizado para o atuador é o **MAXON RE 35** de 90 watts de potencia, os valores nominais do motor são listados a continuação:

Tabela 18: Valores nominais motor MAXON RE 35

Valor Nominal	Valor	Unidade
Voltagem nominal	24	V
Velocidade sem carga	803	rad/s
Corrente sem carga	168	mA
Velocidade nominal	723	rad/s
Torque nominal (Torque maximo continuo)	93.3	mNm
Corrente nominal (Corrente máxima continua)	3.36	A
Torque Stall	1160	mNm
Corrente Stall	39.7	A

Os parâmetros são fornecidos pelo fabricante. Na seguinte tabela mostram-se as características para o modelo do motor.

Tabela 19: Parâmetros Motor MAXON RE 35

Parâmetros	Símbolo	Valor	Unidade
Resistência na Armadura	R_a	0.605	Ω
Indutância na Armadura	L_a	0.191	mH
Constante de Torque	K_T	29.2	mNm/A
Constante de velocidade	K_N	328	rpm/V
Constante mecânica	τ_m	5.6	ms
Inércia do Rotor	J_m	78.7	gcm ²

Substituindo os valores fornecidos pelo fabricante no modelo do motor são achados os pólos do motor:

$$s_1 = -3175.4 \quad e \quad s_2 = -178.5$$

O pólo correspondente à constante elétrica s_1 é 17 vezes menor ao pólo correspondente à constante s_2 .

Na figura 108 mostra-se a velocidade angular de saída, em rad/s, para uma entrada degrau de voltagem de $u(t) = 24v$.

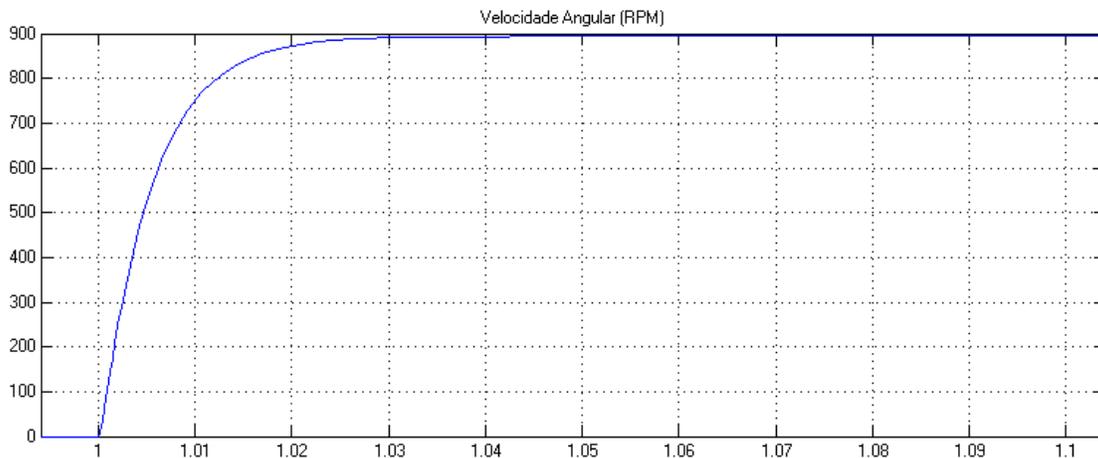


Figura 108: Saida motor para $u(t) = 24v$

O redutor utilizado para o atuador é o MAXON 338006. As especificações do redutor estão na seguinte tabela:

Tabela 20: Parâmetros do redutor MAXON 338006

Característica	Valor	Unidade
Número de etapas	3	
Torque Maximo contínuo	6	Nm
Torque intermitente permitido	7.5	Nm
Eficiência Máxima	70	%
Redução	51:1	
Redução absoluta	17576/343	

Conseqüentemente, para cada 51 voltas do eixo da entrada o eixo da saída gira uma volta, ao eixo de saída está acoplado um parafuso que ao girar desloca linearmente uma polca. As características do parafuso do eixo de saída, MAXON 339469, são as seguintes:

Tabela 21: Parâmetros do parafuso MAXON 339469

Características	Valor	Unidade
Material	Aço	
Tipo rosca	M10x1	
Comprimento	200	Mm

Para cada volta do eixo do parafuso o avanço linear da polca é 1 mm. Então para o um volta do eixo do motor o deslocamento linear da polca é o seguinte:

$$\Delta l = N P \quad (119)$$

Onde,

Δl , deslocamento linear por volta do eixo do motor

N , redução do redutor = $\frac{1}{51}$

P , avanço por volta do parafuso = 1 mm

Substituindo na equação,

$$\Delta l = 1.96 \times 10^2 \text{ mm}$$

O sensor de posição utilizado para o atuador é um encoder incremental **MAXOM 225787**, que se encontra acoplado ao eixo do motor, a medição da posição angular é feita diretamente no eixo do motor. Assim, para cada volta do eixo o motor, o encoder conta 1024 pulsos. A relação entre a voltagem na saída e deslocamento na entrada para modelagem do encoder é a seguinte:

$$Ke = \frac{v}{l} \quad (120)$$

Onde,

v , voltagem nominal máximo do motor = 24 v

l , deslocamento máximo linear de saída = 200 mm

Substituído,

$$Ke = 12 \times 10^{-2} \text{ v/m}$$

Para uma entrada degrau de posição $u(t) = 100 \text{ mm}$, e o tempo em segundos, a saída de posição linear é mostrada na figura 109.

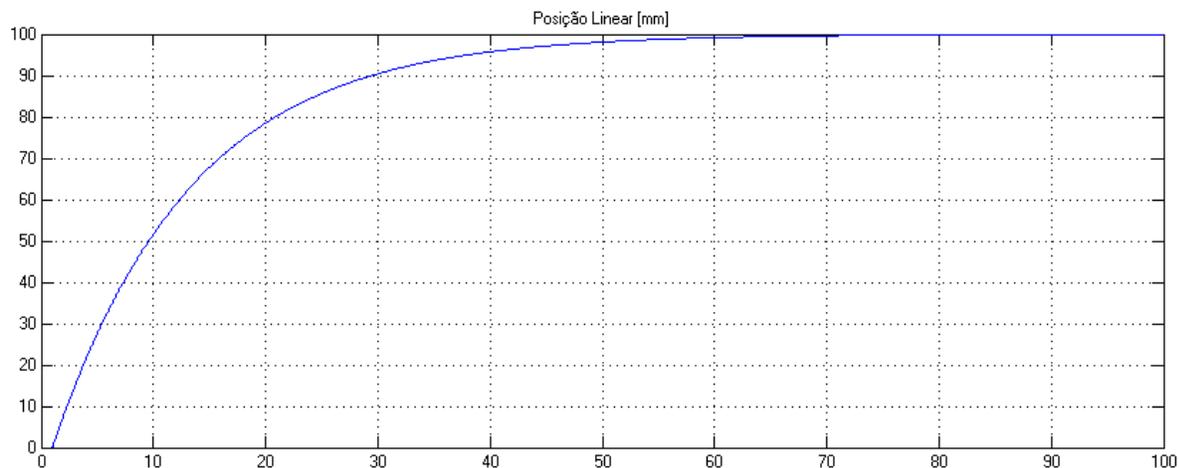
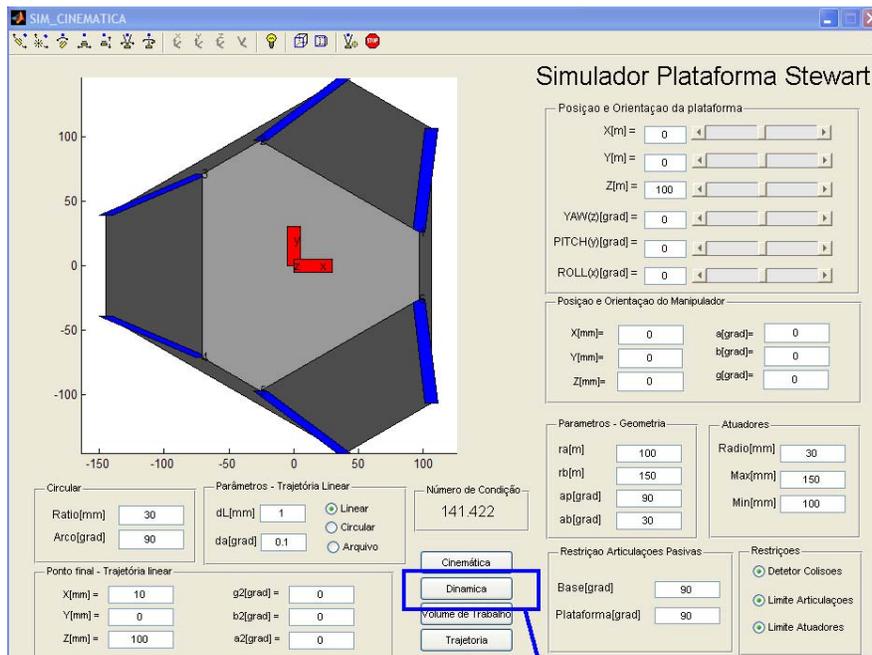


Figura 109: Saída do atuador para $u(t) = 100 \text{ m}$

ANEXO V

E.1 Uso Do Ambiente de Simulação

A primeira tela que aparece no ambiente de simulação corresponde à simulação cinemática (figura 110) uma vez efetuada a simulação cinemática, com a trajetória no espaço de trabalho pronta, se executa a simulação dinâmica mediante o botão dinâmica.



Simulação Dinâmica

Figure 110: Execução simulação cinemática

Depois desta operação aparece a tela correspondente a interface para entrada dos dados para a simulação dinâmica (Figura 111). Com os dados para a simulação dinâmica na interface dinâmica e mediante o botão dinâmica é executado a simulação em *SIMULINK* mostrada na figura 112.

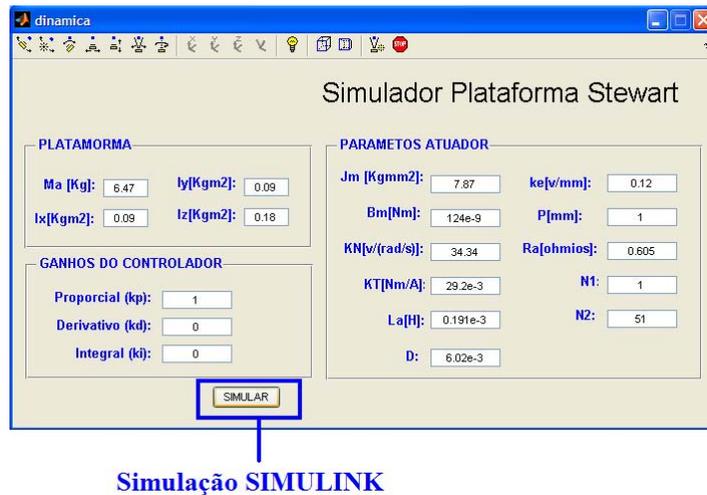


Figure 111: Execução simulação dinâmica

E. 2 Simulação dinâmica

A simulação dinâmica do manipulador e dos atuadores foi realizada no *SIMULINK* de *MATLAB*. Todas as equações estabelecidas no modelo foram representadas em diagramas de blocos da seguinte maneira, na figura 112 é mostrado o diagrama total do manipulador e o controle no espaço das juntas.

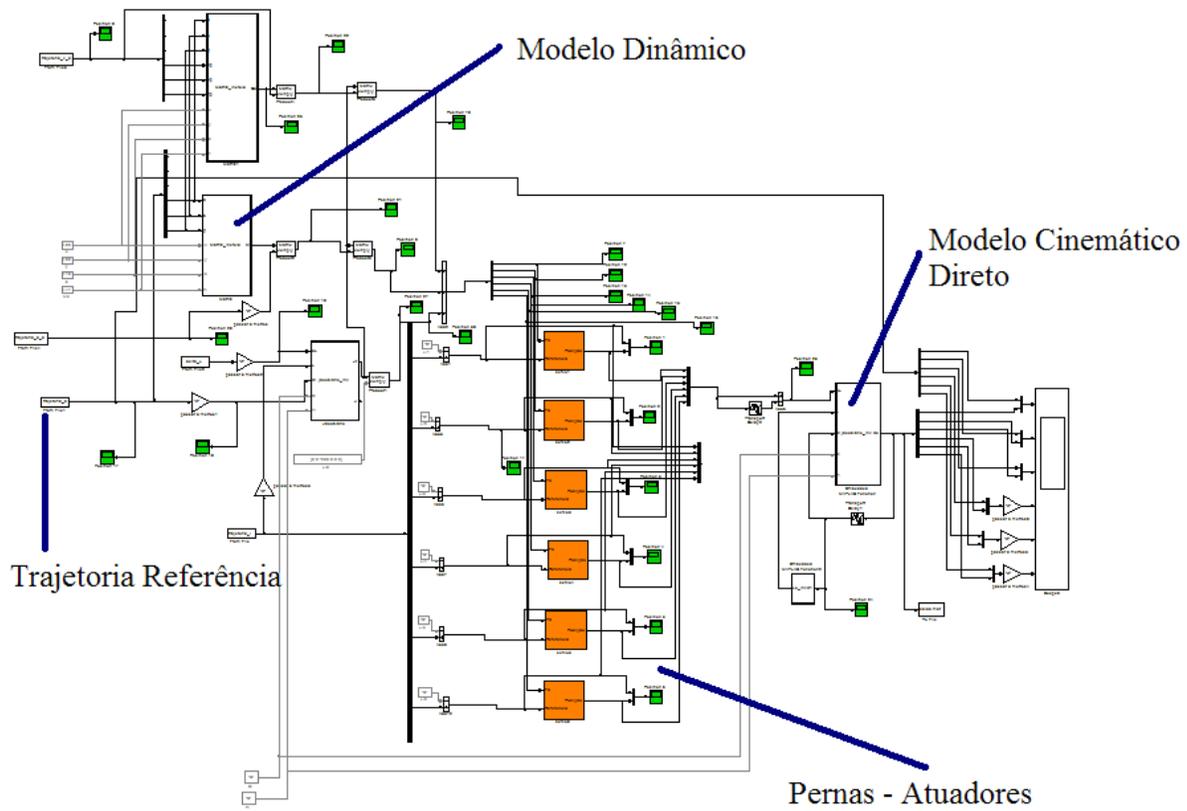


Figura 112: Simulação dinâmica em SIMULINK