

**Mauricio Becerra Vargas**

***CONTROLE DE UMA PLATAFORMA DE MOVIMENTO  
DE UM SIMULADOR DE VÔO***

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Aeronaves.

Orientador: Prof. Tit. Eduardo Morgado Belo

São Carlos

- Outubro/2009 -

*“À minha família, com Amor e Gratidão.”*

# *Agradecimentos*

---

Ao Prof. Dr. Eduardo Morgado Belo pela orientação, amizade e confiança depositada na realização deste trabalho durante estes anos.

A todos meus amigos de laboratório: Edson, Luciane, Daniela, Paulo, Elizangela, Naga, Andreia e Hernan pela sua amizade.

A nossos funcionários Claudio, Gisele e Carlinhos pela sua colaboração e amizade.

A todos os professores que de certa forma contribuíram na realização desta pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram na realização deste trabalho.



# Sumário

---

<b>Resumo</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xix</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Revisão Bibliográfica . . . . .	2
1.2.1 Controle de Posição . . . . .	3
1.2.2 Controle de Força . . . . .	9
1.2.3 Controle Não Convencional de Posição . . . . .	10
1.2.4 Trabalhos realizados na Universidade de São Paulo-USP . . . . .	11
1.2.5 Simuladores de Movimento . . . . .	12
1.3 Objetivos e contribuição do trabalho . . . . .	15
1.4 Estrutura do Texto . . . . .	16

---

<b>2</b>	<b>Aspectos Gerais sobre Simuladores de Vôo</b>	<b>19</b>
2.1	Introdução . . . . .	19
2.2	Importância dos Simuladores de Vôo . . . . .	19
2.3	Classificação dos Simuladores de Vôo . . . . .	20
2.3.1	Simuladores de Engenharia (Projeto do Veículo) . . . . .	20
2.3.2	Simuladores de Pesquisa (Projeto de Simulação) . . . . .	21
2.3.3	Simuladores de Treinamento . . . . .	21
2.3.4	Simuladores de Entretenimento . . . . .	22
2.4	Componentes e Funcionamento de um Simulador de Vôo . . . . .	22
2.5	Percepção de Movimentos . . . . .	23
2.5.1	O Sistema Visual . . . . .	24
2.5.2	O Sistema Vestibular . . . . .	25
	Canais Semicirculares . . . . .	25
	Órgãos Otólitos . . . . .	26
2.6	Simulação de Movimento . . . . .	26
2.7	Algoritmo de Sensação de Movimento - Filtro <i>Wash-Out</i> . . . . .	27
2.7.1	Tipos de Filtros <i>Wash-Out</i> . . . . .	29
2.8	O simulador de vôo da Universidade de Toronto - UTIAS . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Descrição do Mecanismo de Movimento</b>	<b>33</b>
3.1	Introdução . . . . .	33
3.2	Plataforma de Stewart . . . . .	34
3.3	Dinâmica da Plataforma de Stewart . . . . .	35

---

3.3.1	Matriz de Rotação $\mathfrak{R}$ . . . . .	35
3.3.2	Análise Cinemática de um Atuador . . . . .	37
	<i>Análise de Posição</i> . . . . .	37
	<i>Análise de Velocidade</i> . . . . .	38
	<i>Análise de Aceleração</i> . . . . .	39
3.3.3	Análise Dinâmica de um Atuador . . . . .	44
3.3.4	Análise Cinemática e Dinâmica da Plataforma . . . . .	47
3.3.5	Equações Dinâmicas em Coordenadas Cartesianas . . . . .	48
3.3.6	Equações Dinâmicas em Coordenadas das Juntas . . . . .	52
3.4	Sistema de Acionamento Eletromecânico . . . . .	53
3.4.1	Atuador Electromecânico . . . . .	54
3.4.2	Modelagem do Atuador Electromecânico . . . . .	55
3.5	Modelo dinâmico em coordenadas cartesianas considerando a dinâmica do atuador . . . . .	56
3.6	Cinemática inversa e cinemática direta . . . . .	58
3.7	Espaço de trabalho da base de movimento . . . . .	59
3.8	Singularidades da matriz jacobiana . . . . .	62
<b>4</b>	<b>Modelo Dinâmico da Aeronave</b>	<b>67</b>
4.1	Introdução . . . . .	67
4.2	Modelo Dinâmico . . . . .	67
4.3	Aceleração linear e velocidade angular sentidas pelo piloto . . . . .	73
<b>5</b>	<b>Algoritmo de movimento - Washout Filter</b>	<b>75</b>

5.1	Introdução . . . . .	75
5.2	Conceito de força específica . . . . .	76
5.3	Sistemas de Referência do Algoritmo de Movimento . . . . .	76
5.4	Algoritmo de movimento clássico - <i>washout filter</i> . . . . .	79
5.4.1	Canal de Translação . . . . .	80
5.4.2	Canal de Coordenação de Inclinação . . . . .	81
5.4.3	Canal de Rotação . . . . .	84
<b>6</b>	<b>Sistema de Controle do Mecanismo de Movimento</b>	<b>85</b>
6.1	Introdução . . . . .	85
6.2	Estratégias de Controle . . . . .	87
6.2.1	Controle baseado na dinâmica inversa . . . . .	89
6.2.2	Compensação imperfeita do controle baseado na dinâmica inversa . . . . .	91
6.2.3	Projeto da malha externa baseado na teoria de Lyapunov . . . . .	93
6.2.4	Projeto da malha externa baseado na teoria de controle $H_\infty$ . . . . .	95
	Seleção das funções de ponderação . . . . .	97
6.2.5	Característica das matrizes da equação dinâmica da plataforma . . . . .	98
6.3	Avaliação do Sistema de Movimento . . . . .	99
6.3.1	Função Descritiva . . . . .	99
6.3.2	Limiar dinâmico - <i>Dynamic Threshold</i> . . . . .	102
6.3.3	Histerese . . . . .	103
6.3.4	Nível de Ruído . . . . .	103
6.3.5	Manobras . . . . .	104



---

<b>7</b>	<b>Resultados</b>	<b>109</b>
7.1	Introdução . . . . .	109
7.2	Limiar dinâmico . . . . .	110
7.3	Função descritiva . . . . .	112
7.4	Manobras . . . . .	118
<b>8</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>127</b>
8.1	Conclusões . . . . .	127
8.2	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	129
	<b>Bibliografia</b>	<b>131</b>
<b>A</b>	<b>Fundamentos Matemáticos</b>	<b>137</b>
A.1	Função Transferência . . . . .	137
A.2	Controlabilidade e observabilidade . . . . .	138
A.3	Transformação Linear Fracional LFT . . . . .	139
A.4	Algoritmo $H_\infty$ . . . . .	140
<b>B</b>	<b>Especificações da plataforma de movimento</b>	<b>143</b>
B.1	Parâmetros Geométricos . . . . .	143
B.2	Propriedades de massa . . . . .	144
<b>C</b>	<b>Especificações do atuador electromecânico</b>	<b>147</b>



## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

