

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Elétrica

Fundamentos de Controle - EEL7531
Notas de Aula - Parte Linear (Versão 6)

Hamilton Medeiros Silveira, D. Et.

08/2010

Sumário

Prefácio	iv
1 Modelos e Solução no Espaço de Estado	1
1.1 Conceito de Sistema Linear	1
1.2 Representação de um Sistema Linear por Equação Diferencial ou a Diferença	1
1.2.1 Caso Contínuo	1
1.2.2 Caso Discreto	2
1.3 Conceito de Variável de Estado	2
1.3.1 Primeiro Exemplo	4
1.3.2 Segundo Exemplo	5
1.3.3 Terceiro Exemplo	6
1.4 Geração de Variáveis de Estado a Partir de Equações Diferenciais ou a Diferença	
Um Caso Particular	7
1.4.1 Caso Contínuo	7
1.4.2 Caso Discreto	8
1.5 Processo em Variáveis de Estado	
Caso Geral	8
1.5.1 Caso Contínuo	8
1.5.2 Caso Discreto	9
1.5.3 Exemplo 1	10
1.5.4 Exemplo 2	10
1.6 Sistemas Lineares em Variáveis de Estado	11
1.7 Blocos	12
1.8 Perturbação	12
1.9 Perturbação em Variáveis de Estado	
Caso Particular	13
1.9.1 Caso Contínuo	13
1.9.2 Caso Discreto	14
1.10 Perturbação em Variáveis de Estado	
Caso Geral	16
1.10.1 Caso Contínuo	16
1.10.2 Caso Discreto	16
1.11 Processo com Perturbação em Variáveis de Estado	16
1.11.1 Caso Contínuo	16
1.11.2 Caso Discreto	17
1.12 Conexões	18
1.12.1 Caso Contínuo	18
1.12.2 Caso Discreto	20
1.12.3 Exemplo	21
1.13 Solução Temporal	24
1.13.1 Caso Contínuo	24
1.13.2 Caso Discreto	24
1.14 Determinação da Equação de Estado Discreta a Partir da Contínua	25
1.14.1 Modelo do BOZ-Processo	27
1.14.2 Exemplo	28
1.14.3 Modelo da Perturbação	29
1.15 Exercícios	30

1.16	Respostas dos Exercícios	32
2	Controlabilidade, Observabilidade e Estabilidade	35
2.1	Conceito de Controlabilidade	35
2.1.1	Caso Contínuo	35
2.1.2	Caso Discreto	35
2.2	Conceito de Observabilidade	36
2.2.1	Caso Contínuo	36
2.2.2	Caso Discreto	36
2.3	Domínio Freqüência	37
2.3.1	Caso Contínuo	37
2.3.2	Caso Discreto	38
2.4	Estabilidade	39
2.4.1	Caso Contínuo	39
2.4.2	Caso Discreto	40
2.5	Teorema de Kalman	40
2.5.1	Caso Contínuo	40
2.5.2	Caso Discreto	40
2.6	Transformação de Similaridade	41
2.6.1	Caso Contínuo	41
2.6.2	Caso Discreto	42
2.7	Forma Canônica de Controlabilidade	42
2.7.1	Caso Contínuo	42
2.7.2	Caso Discreto	43
2.8	Forma Canônica de Observabilidade	45
2.8.1	Caso Contínuo	45
2.8.2	Caso Discreto	46
2.9	Exemplo	47
2.10	Exercícios	52
2.11	Respostas dos Exercícios	53
3	Controle Modal e Observador de Estado - Estabilizador 1	54
3.1	Princípio de Controle Modal	54
3.1.1	Caso Contínuo	54
3.1.2	Caso Discreto	54
3.2	Projeto de Controle Modal	55
3.2.1	Caso Contínuo	55
3.2.2	Caso Discreto	56
3.3	Princípio de Observador de Estado	57
3.3.1	Caso Contínuo	58
3.3.2	Caso Discreto	58
3.4	Projeto de Observador de Estado	58
3.4.1	Caso Contínuo	59
3.4.2	Caso Discreto	60
3.5	Controle Modal com Observador de Estado - Estabilizador	61
3.5.1	Caso Contínuo	61
3.5.2	Caso Discreto	62
3.6	Exemplo	64
3.7	Exercícios	68
3.8	Respostas dos Exercícios	69
4	Controle Ótimo e Filtro de Kalman - Estabilizador 2	70
4.1	Princípio de Controle Ótimo	70
4.1.1	Caso Contínuo	70
4.1.2	Caso Discreto	71
4.2	Projeto de Controle Ótimo	71
4.2.1	Caso Contínuo	71
4.2.2	Caso Discreto	72
4.2.3	Exemplo	72

4.3	Princípio do Filtro de Kalman	73
4.3.1	Caso Contínuo	73
4.3.2	Caso Discreto	73
4.4	Projeto do Filtro de Kalman	74
4.4.1	Caso Contínuo	74
4.4.2	Caso Discreto	74
4.4.3	Exemplo	74
4.5	Controle Quadrático com Filtro de Kalman - Estabilizador	75
4.5.1	Caso Contínuo	75
4.5.2	Caso Discreto	77
4.6	Exercícios	78
4.7	Respostas dos Exercícios	79
5	Seguimento Robusto	80
5.1	O sinal de Referência e a Perturbação	80
5.1.1	Caso Contínuo	80
5.1.2	Caso Discreto	81
5.2	Princípio de Seguidor Robusto	81
5.2.1	Caso Contínuo	81
5.2.2	Caso Discreto	85
5.3	Projeto de Seguidor Robusto	89
5.3.1	Caso Contínuo	89
5.3.2	Caso Discreto	90
5.3.3	Exemplo	92
5.4	Exercícios	94
5.5	Respostas dos Exercícios	96
6	Síntese de Sistemas Descritos por Equações de Estado Contínuas	98
6.1	Amplificador Operacional Ideal	98
6.2	Somador	99
6.3	Inversor	99
6.4	Integrador	100
6.5	Exemplo	103
6.6	Exercícios	103
6.7	Respostas dos Exercícios	105
	Referências Bibliográficas	107

Prefácio

Estas Notas de Aula referem-se à parte linear da Disciplina -EEL7531- Fundamentos de Controle, recentemente criada no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina com o objetivo de complementar os conhecimentos na área de controle, introduzidos pela Disciplina -EEL7063- Sistemas de Controle.

Procurou-se objetivamente dar os conceitos mínimos para o completo entendimento do problema de seguimento robusto de processos submetidos a uma perturbação determinística.

Estas Notas cobrem simultaneamente tanto os controladores contínuos, quanto os discretos; sendo os processos e controladores descritos pela moderna abordagem de variáveis de estado.