

---

# Índice

<b>1 - Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 - Introdução aos Sistemas de Controlo .....	1
1.2 - Definições .....	3
1.3 - Projecto, modelagem e análise .....	4
<b>2 - Modelos Matemáticos de Sistemas Contínuos .....</b>	<b>5</b>
2.1 - Aproximação linear de sistemas físicos .....	5
2.2 - Equações diferenciais de sistemas físicos .....	6
2.2.1 - Sistemas eléctricos .....	7
2.2.2 - Sistemas Mecânicos Translacionais .....	8
2.2.2.1 - Sistemas Análogos .....	10
2.2.3 - Sistemas Mecânicos Rotacionais .....	11
2.2.4 - Sistemas Térmicos .....	13
2.2.5 - Sistemas fluídicos .....	15
2.3 - Componentes de sistemas .....	16
2.3.1 - Potenciómetros .....	16
2.3.2 - Transformador diferencial linear variável .....	17
2.3.3 - Acelerómetro .....	17
2.3.4 - Taquímetros .....	18
2.3.5 - Motores de controlo AC .....	19
2.3.6 - Motores de controlo DC .....	19
2.3.6.1 - Motor DC controlado pelo indutor .....	20
2.3.6.2 - Motor DC controlado pelo induzido .....	20
<b>3 - Representação de Sistemas .....</b>	<b>22</b>
3.1 - Funções de transferência e diagramas de blocos .....	22
3.2 - Sistemas em malha fechada .....	24
3.3 - Resolução de diagramas de blocos .....	25

3.4 - Diagramas de fluxo de sinal .....	27
3.5 - Resolução de diagramas de fluxo de sinal.....	28
<b>4 - Análise de Sistemas no Domínio do Tempo .....</b>	<b>30</b>
4.1 - Introdução.....	30
4.2 - Resposta transitória.....	31
4.2.1 - Resposta transitória em função da localização dos pólos no plano s.....	31
4.2.2 - Constantes de tempo de um sistema e especificações da resposta.....	33
4.2.3 - Sistemas de 2ª ordem e regimes da resposta transitória.....	34
4.3 - Resposta em regime estacionário.....	38
4.3.1 - Tipos de sistema e constantes de erro em regime estacionário .....	39
4.4 - Estabilidade .....	41
4.4.1 - Critério de estabilidade de Routh-Hurwitz .....	42
4.5 - Método do lugar das raízes.....	44
4.5.1 - Trajectórias das raízes da polinomial característica: exemplo de um sistema de 2ª ordem.....	44
4.5.2 - Condição da amplitude e dos ângulos .....	45
4.5.3 - Regras de construção manual do lugar das raízes .....	47
4.5.3.1 - Número de ramos .....	48
4.5.3.2 - Simetria.....	48
4.5.3.3 - Início .....	48
4.5.3.4 - Términos.....	48
4.5.3.5 - Lugar das raízes sobre o eixo real .....	48
4.5.3.6 - Assíntotas quando .....	49
4.5.3.7 - Pontos de saída ou entrada no eixo real.....	50
4.5.3.8 - Intersecção do lugar das raízes com o eixo imaginário.....	51
4.5.3.9 - Conservação da soma do lugar das raízes .....	51
<b>5 - Análise de sistemas no domínio da frequência .....</b>	<b>53</b>
5.1 - Resposta em regime estacionário a uma onda sinusoidal .....	53
5.2 - Traçado logarítmico - Diagramas de Bode .....	54
5.2.1 - Diagramas de Bode para diferentes tipos de factores .....	55
5.2.1.1 - Ganho .....	56
5.2.1.2 - Factores integradores e derivativos .....	56
5.2.1.3 - Factores de 1ª ordem .....	57
5.2.1.4 - Factores quadráticos .....	59
5.2.2 - Diagramas de Bode para uma função de transferência genérica.....	61
5.2.3 - Sistemas com fase mínima .....	63
5.3 - Traçado polar- Diagramas de Nyquist .....	64
5.3.1 - Diagramas de Nyquist para diferentes factores.....	65
5.3.1.1 - Integradores e derivativos.....	65
5.3.1.2 - Factores de primeira ordem .....	66
5.3.1.3 - Factores quadráticos .....	67
5.3.1.4 - Factor de atraso.....	68
5.3.2 - Diagramas de Nyquist para funções de transferência genéricas .....	68

---

---

5.3.3 - Traçado de Nyquist quando existem pólos no eixo imaginário .....	69
5.4 - Traçado de Nichols.....	70
5.5 - Comparação dos vários traçados .....	71
5.6 - Critério de estabilidade de Nyquist.....	72
5.6.1 - Bases matemáticas .....	73
5.6.2 - Aplicação para sistemas de controlo .....	74
5.6.3 - Exemplo de aplicação .....	76
5.6.4 - Sistemas com tempo de atraso .....	78
5.7 - Margens de ganho e de fase.....	79
5.7.1 - Exemplo .....	79
5.8 - Resposta em malha fechada.....	81
<b>6 - Compensação de sistemas .....</b>	<b>83</b>
6.1 - Topologias de compensação .....	83
6.2 - 1.2Compensadores avanço, atraso e atraso- avanço .....	84
6.3 - Compensação utilizando o método do lugar das raízes .....	88
6.3.1 - Resposta transitória: polos complexos dominantes.....	88
6.3.2 - Exemplo: Compensadores PID .....	89
6.3.2.1 - Compensação P .....	89
6.3.2.2 - Compensação PI.....	91
6.3.2.3 - Compensação PD.....	94
6.3.2.4 - Compensação PID .....	96
6.3.3 - Compensação atraso e avanço.....	99
6.3.3.1 - Compensação no plano s usando o compensador avanço .....	99
6.3.3.2 - Compensação no plano s usando compensadores atraso.....	102
6.3.3.3 - Compensação no diagrama de Bode usando um compensador atraso .....	105
6.3.3.4 - Compensação no diagrama de Bode usando um compensador avanço .....	107

