

Sumário

1. Caracterização dos Sistemas de Tempo Real.....	15
1.1 Definição.....	15
1.2 Requisitos Temporais.....	16
1.3 Classes de Aplicações.....	17
1.4 Características Comuns.....	19
1.5 Concepções Erradas.....	22
1.6 Exemplo: Controle Realimentado de Caldeira.....	23
1.7 Exemplo: Sistema de Defesa Antimíssil.....	24
1.8 Exercícios.....	27
2. Conceitos Básicos dos Sistemas de Tempo Real.....	29
2.1 Conceito de Tarefa.....	29
2.2 Tipos de Deadlines.....	30
2.3 Previsibilidade.....	32
2.4 Recorrência das Tarefas.....	33
2.5 Tempo de Execução.....	34
2.6 Propriedades Temporais das Tarefas.....	36
2.7 Relações de Exclusão Mútua.....	38
2.8 Relações de Precedência.....	39
2.9 Escalonamento.....	40
2.10 Modelo de Tarefas.....	41
2.11 Exercícios.....	42
3. O Tempo Real.....	45
3.1 O Tempo Mecânico.....	45
3.2 O Tempo Astronômico.....	46
3.2.1 Universal Time (UT).....	47
3.2.2 Ephemeris time (ET).....	47
3.3 O Tempo Atômico.....	48
3.3.1 O Mecanismo do Relógio Atômico.....	48
3.3.2 Quanto Tempo é 1 Segundo?.....	49
3.3.3 Tempo Atômico Internacional (TAI).....	50
3.3.4 Tempo Universal Coordenado (UTC).....	51
3.4 O Tempo Real no Século 21.....	52
3.4.1 O Sistema de Posicionamento Global (GPS).....	54
3.4.2 Network Time Protocol (NTP).....	55
3.5 O Tempo Real nos Computadores.....	57
3.5.1 Os Vários Relógios de um PC 80x86.....	59
3.6 O Sincronização de Relógios entre Computadores.....	62
3.7 Considerações Finais.....	66
3.8 Exercícios.....	67
4. Variabilidade dos Tempos de Execução.....	71
4.1 Introdução.....	71

4.2 Variabilidade Causada pelo Software	74
4.3 Variabilidade Causada pelo Hardware	77
4.3.1 Memória Cache	78
4.3.2 Pipeline	81
4.3.3 Previsor de Salto (<i>Branch Predictor</i>)	86
4.3.4 Memórias DRAM	86
4.3.5 Acesso Direto à Memória – DMA	87
4.3.6 <i>Translation Lookaside Buffer</i> – TLB	88
4.3.7 Controle de Frequência	89
4.3.8 Modo de Gerência do Sistema	89
4.3.9 Múltiplas Threads em Hardware	91
4.3.10 Impacto dos Tratadores de Interrupção e de Múltiplas Tarefas	92
4.4 Exercícios	94
5. Estimação do WCET usando Análise Estática	97
5.1 Introdução	97
5.2 Importância do Tipo de Hardware	99
5.3 Análise Estática	99
5.4 Análise do Fluxo de Controle	100
5.5 Análise do Comportamento do Processador	103
5.5.1 Análise da Memória Cache	106
5.5.2 Análise do Pipeline	106
5.6 Cálculo do Limite Superior para o WCET	108
5.7 A Ferramenta aiT	110
5.8 Considerações Finais	112
5.9 Exercícios	113
6. Estimação do WCET usando Medições	115
6.1 Introdução	115
6.2 Medição do Tempo de Execução	117
6.3 Teste de Software Baseado em Busca	120
6.4 Métodos Híbridos	121
6.5 A Ferramenta RapiTime	122
6.6 Métodos Estatísticos	123
6.6.1 Teoria de Valores Extremos	124
6.6.2 Avaliação Experimental	129
6.7 Considerações Gerais	130
6.8 Exercícios	131
7. Implementação de Tarefas em Sistemas Pequenos	135
7.1 Executivo Cíclico	135
7.2 Mecanismo de Interrupções	140
7.3 Laço Principal com Tratadores de Interrupções	144
7.4 Microkernel Simples como Sistema Operacional Multitarefa	146
7.4.1 Chamadas de Sistema	147
7.4.2 Estados de uma Thread	150

7.4.3	Chaveamento de Contexto entre Threads	152
7.4.4	Design do Microkernel.....	153
7.5	Comparação entre as Formas de Implementar Tarefas de Tempo Real	156
7.6	Exercícios.....	157
8.	Implementação de Tarefas em Kernel Completo.....	163
8.1	O Sistema Operacional Tradicional	163
8.2	Terminologia: Processos, Threads e Tarefas	165
8.3	Chamadas de Sistema.....	166
8.4	Estados da Thread de um Processo	168
8.5	Chaveamento de Contexto	170
8.6	Gerência de Memória.....	172
8.7	Partições Variáveis.....	174
8.8	Paginação	177
8.9	Outros Aspectos da Paginação.....	183
8.10	Memória Virtual com Paginação por Demanda.....	184
8.11	Comparação entre as Formas de Implementar Tarefas de Tempo Real	187
8.12	Exercícios.....	187
9.	Escalonamento em Sistemas de Propósito Geral	195
9.1	Introdução	195
9.2	Ordem de Chegada.....	196
9.3	Menor Ciclo de Processamento Antes	197
9.4	Fatias de Tempo	197
9.5	Prioridades	199
9.6	Combinação das Formas Básicas.....	200
9.7	Exercícios.....	202
10.	Escalonamento em Sistemas de Tempo Real.....	207
10.1	Introdução	207
10.2	Atribuição de Prioridades Fixas.....	208
10.2.1	Taxa Monotônica	208
10.2.2	Deadline Monotônico.....	208
10.2.3	Importância	210
10.3	Atribuição de Prioridades Variáveis	210
10.3.1	Menor Deadline Absoluto Antes	211
10.3.2	Menor Folga Antes	212
10.4	Conceito de Utilização e Teoremas Fundamentais	213
10.4.1	Limiar de Utilização para EDF	214
10.4.2	Limiar de Utilização para Taxa Monotônica	216
10.4.3	Deadline Monotônico versus Taxa Monotônica	217
10.5	Questões Práticas da Atribuição de Prioridades	218
10.5.1	Escalonabilidade superior do EDF em Modelos Simples.....	218
10.5.2	Comportamento em Sobrecarga.....	220
10.5.3	Custo da Implementação.....	223
10.6	Exercícios.....	224

11. Sincronização e Comunicação entre Tarefas	227
11.1 Caracterização da Programação Concorrente	227
11.2 Motivação para Programação Concorrente.....	228
11.3 Métodos de Sincronização e Comunicação entre Tarefas	230
11.4 Sincronização e Comunicação com Mensagens	231
11.5 Padrões de Interação Usando Mensagens	234
11.6 Sincronização e Comunicação com Variáveis Compartilhadas.....	236
11.7 Problema da Seção Crítica	237
11.8 Seção Crítica: Mecanismos de Baixo Nível.....	242
11.9 Seção Crítica: Mutex.....	245
11.9.1 Aninhamento de Mutex.....	247
11.10 Deadlock	248
11.11 Exercícios.....	249
12. Seções Críticas em Sistemas de Tempo Real.....	253
12.1 Inversão de Prioridades.....	253
12.2 Mutex para Tempo Real.....	255
12.3 Mutex para Tempo Real: Desliga Preempção.....	257
12.4 Mutex para Tempo Real: Herança de Prioridade.....	259
12.5 Mutex para Tempo Real: Teto de Prioridade.....	263
12.6 Mutex para Tempo Real: Teto de Prioridade Imediato.....	268
12.7 Mutex para Tempo Real: Outros Protocolos.....	270
12.8 Exercícios.....	271
13. Mecanismos de Sincronização com Variáveis Compartilhadas	275
13.1 Problemas Clássicos de Sincronização	275
13.2 Semáforos	277
13.3 Monitores	280
13.4 Monitores com a Linguagem C e Pthreads	282
13.5 Exercícios.....	288
14. Variabilidade dos Tempos de Resposta	295
14.1 Fontes da Variabilidade do Tempo de Resposta.....	295
14.2 Variabilidade Causada por Outras Tarefas da Aplicação	296
14.3 Variabilidade Causada por Outros Processos do Sistema.....	296
14.4 Variabilidade Causada por Threads do Kernel	297
14.5 Variabilidade Causada por Tratadores de Interrupção.....	297
14.6 Variabilidade Causada pela Manipulação das Prioridades	298
14.7 Variabilidade Causada por Kernel Não-Preemptivo.....	299
14.8 Variabilidade Causada pela Desabilitação das Interrupções	300
14.9 Variabilidade Causada por <i>Overhead</i> do Kernel	301
14.10 Variabilidade Causada por Mecanismos de Sincronização na Aplicação	303
14.11 Variabilidade Causada por Mecanismos de Sincronização no Kernel	304
14.12 Determinação do Tempo de Resposta no Pior Caso.....	305
14.13 Exercícios.....	307
15. Estimação do Tempo de Resposta usando Análise.....	309

15.1	Princípios da Análise do Tempo de Resposta.....	309
15.2	Método Básico da Análise do Tempo de Resposta.....	311
15.3	Tarefas Esporádicas e Tarefas com $D \leq P$	317
15.4	Interrupções Desabilitadas	318
15.5	Bloqueios	320
15.6	Chaveamentos de Contexto.....	322
15.7	Tratadores de Interrupções.....	323
15.8	Níveis Insuficientes de Prioridades.....	324
15.9	Atribuição Ótima de Prioridades	324
15.10	Exemplo de Análise do Tempo de Resposta.....	325
15.11	Aspectos Práticos da Análise do Tempo de Resposta no Pior Caso.....	327
15.12	Exercícios.....	329
16.	Estimação do Tempo de Resposta usando Medições.....	333
16.1	Estimação do WCRT via Medição.....	333
16.2	Visão Estatística das Medições	335
16.3	Exercícios.....	340
17.	Diferentes Abordagens.....	341
17.1	Diferentes Abordagens são Necessárias	341
17.2	Classificação das Abordagens na Academia.....	342
17.2.1	Sistemas com Garantia (<i>hard real-time systems</i>).....	343
17.2.2	Sistemas sem Garantia (<i>soft real-time systems</i>).....	344
17.3	Classificação das Abordagens na Prática.....	347
17.3.1	Classificação na Prática: Garantia Provada	349
17.3.2	Classificação na Prática: Garantia Testada	350
17.3.3	Classificação na Prática: Sem Garantia	351
17.4	Abordagem Definida pela Criticalidade	352
17.5	Comentários sobre as Abordagens.....	353
17.6	Exercícios.....	354
18.	Sistemas Operacionais de Tempo Real.....	355
18.1	Introdução	355
18.2	Aspectos Funcionais dos SOTR.....	356
18.3	Aspectos Temporais dos SOTR.....	358
18.3.1	Aspectos Temporais de um SOTR: O Ideal Impossível	360
18.3.2	Aspectos Temporais de um SOTR: O Ideal Possível porém Inexistente.....	360
18.3.3	Aspectos Temporais de um SOTR: A Realidade.....	363
18.4	Principais Diferenças Construtivas entre SOPG e SOTR.....	364
18.4.1	Algoritmo de Escalonamento Adequado	364
18.4.2	Níveis de Prioridade Suficientes	365
18.4.3	Sistema Operacional não Altera Prioridades das Tarefas	365
18.4.4	Tratadores de Interrupções com Execução Rápida.....	365
18.4.5	Desabilitar Interrupções ao Mínimo	366
18.4.6	Emprego de Threads de Kernel.....	366
18.4.7	Tempo de Chaveamento entre Tarefas Pequeno.....	368

18.4.8 Emprego de Temporizadores com Alta Resolução.....	368
18.4.9 Comportamento das Chamadas de Sistema no Pior Caso	369
18.4.10 Preempção de Tarefa Executando Código do Kernel	370
18.4.11 Mecanismos de Sincronização Apropriados.....	371
18.4.12 Granularidade das Seções Críticas dentro do Kernel.....	371
18.4.13 Gerência de Recursos em Geral.....	372
18.5 Cuidados do Desenvolvedor da Aplicação	372
18.6 Microkernel Exemplo: FreeRTOS.....	375
18.6.1 Tratadores de Interrupção da Aplicação	377
18.6.2 Mecanismos de Sincronização	378
18.7 Kernel Exemplo: Linux PREEMPT_RT	379
18.7.1 Modelos de Preempção no Kernel do Linux.....	380
18.7.2 Políticas de Escalonamento.....	382
18.7.3 Programação da Aplicação.....	383
18.7.4 Serviços de Tempo para a Aplicação.....	384
18.7.5 Mecanismos de Sincronização para a Aplicação	384
18.7.6 Impacto da Gestão de Energia	385
18.8 Considerações Finais	387
18.9 Exercícios.....	389
19. Tópicos Adicionais	393
19.1 Servidores de Tarefas Aperiódicas	393
19.2 Multiprocessadores	395
19.3 Protocolos de Comunicação.....	397
19.4 Protocolos para Sincronização de Relógios.....	399
19.5 Computação Imprecisa.....	400
19.6 Engenharia de Software	402
19.7 Exercícios.....	403
20. Referências Bibliográficas	405
Índice Remissivo.....	417