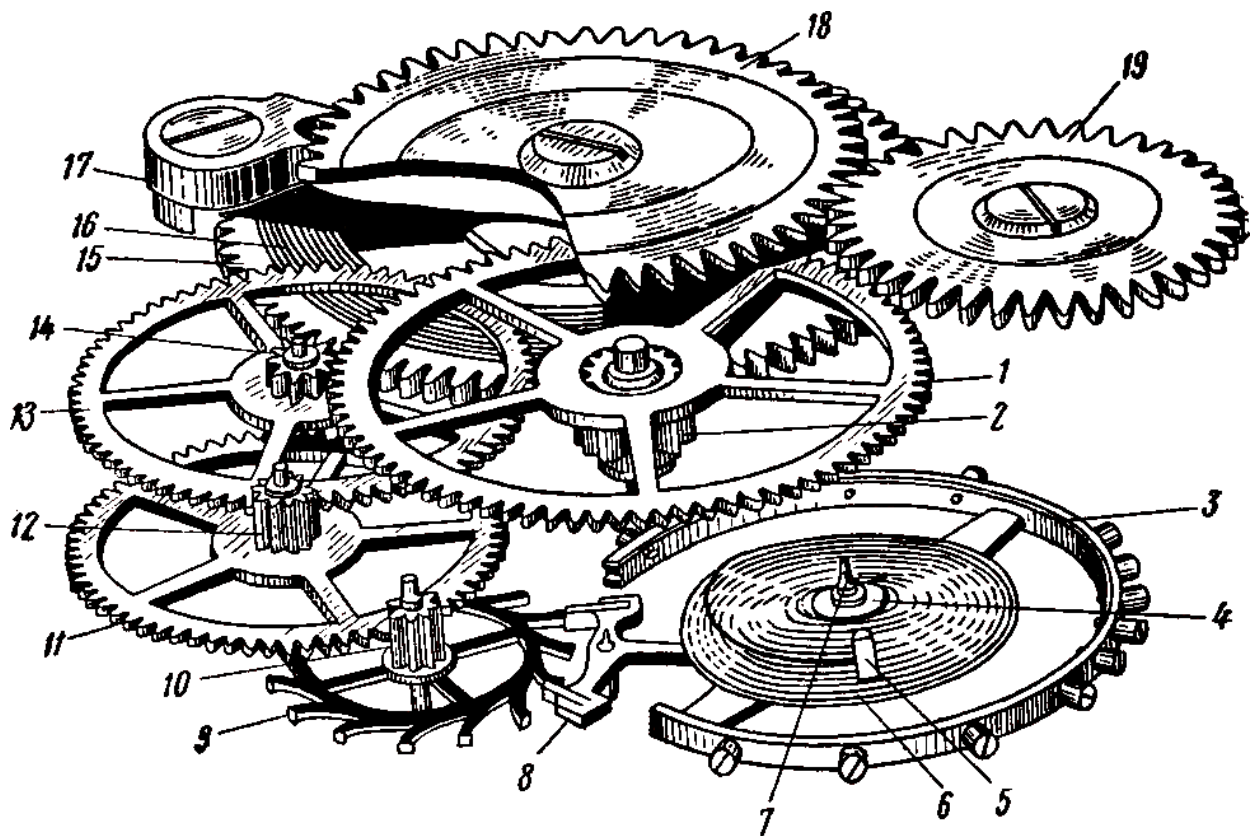


Sistemas Operacionais: Conceitos e Mecanismos

Prof. Carlos A. Maziero



Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

M476s

Maziero, Carlos Alberto

Sistemas operacionais: conceitos e mecanismos [recurso eletrônico] /
Carlos Alberto Maziero. – Curitiba : DINF - UFPR, 2019.

456 p. : il.; color.

ISBN: 978-85-7335-340-2. (E-book)

Inclui bibliografia.

1. Sistemas operacionais (Computadores). 2. Programação de sistemas
(Computação). 3. Gerenciamento de memória (Computação). 4. Segurança
de sistemas. I. Universidade Federal do Paraná. II. DINF -UFPR. III. Título.

CDD: 005.43

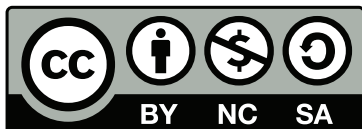
Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928

Sistemas Operacionais: Conceitos e Mecanismos

© Carlos Alberto Maziero, 2013-2019

ISBN: 978-85-7335-340-2

Sobre o autor: Carlos A. Maziero é professor do Depto de Informática da Universidade Federal do Paraná (UFPR) desde 2015. Anteriormente, foi professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) entre 2011 e 2015, professor da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR) entre 1998 e 2011 e professor da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) de 1996 a 1998. Formado em Engenharia Elétrica (UFSC, 1988), tem Mestrado em Engenharia Elétrica (UFSC, 1990), Doutorado em Informática (Université de Rennes I - França, 1994) e Pós-Doutorados na Università degli Studi di Milano – Italia (2009) e no IRISA/INRIA Rennes – França (2018). Atua em ensino e pesquisa nas áreas de sistemas operacionais, sistemas distribuídos e segurança de sistemas.



Texto licenciado sob a Licença *Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported* da *Creative Commons* (CC). Em resumo, você deve creditar a obra da forma especificada pelo autor ou licenciante (mas não de maneira que sugira que estes concedem qualquer aval a você ou ao seu uso da obra). Você não pode usar esta obra para fins comerciais. Se você alterar, transformar ou criar com base nesta obra, você poderá distribuir a obra resultante apenas sob a mesma licença, ou sob uma licença similar à presente. Para ver uma cópia desta licença, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>.

Este texto foi produzido usando exclusivamente software livre: Sistema Operacional *GNU/Linux* (distribuições *Fedora* e *Ubuntu*), compilador de texto $\text{\LaTeX}2_{\epsilon}$, gerenciador de referências *BibTeX*, editor gráfico *Inkscape*, criadores de gráficos *GNUPlot* e *GraphViz* e processador PS/PDF *GhostScript*, entre outros. Algumas figuras do texto usam ícones de <https://www.creativetail.com> e de outras fontes, sob licença *Creative Commons*.

Capa: *Clockwork diagram on rough paper from ancient book*, por Vvoronov, ID Shutterstock 47963683.

Versão compilada em 16 de abril de 2026.

Prefácio

Os sistemas operacionais são elementos fundamentais para o funcionamento de praticamente qualquer sistema de computação, dos minúsculos sistemas embarcados e telefones celulares aos gigantescos centros de processamento de dados das grandes empresas. Apesar da imensa diversidade de sistemas operacionais existentes, eles tentam resolver problemas de mesma natureza e seguem basicamente os mesmos princípios.

Conhecer sistemas operacionais a fundo não é algo reservado a *hackers*, mas importante para todo profissional de computação, pois os mecanismos implementados pelo sistema operacional afetam diretamente o comportamento e o desempenho das aplicações. Além disso, o sistema operacional é uma peça chave na configuração de serviços de rede e na segurança do sistema.

Existem muitos livros de sistemas operacionais disponíveis no mercado, quase todos muito bons, escritos por profissionais reconhecidos mundialmente. Entretanto, bons livros de Sistemas Operacionais podem custar centenas de reais, o que os torna inacessíveis a uma parcela significativa da população. Este livro seria apenas mais uma opção de compra nas livrarias, não fosse por um pequeno detalhe: foi concebido como um Livro Aberto, desde seu início. Um Livro Aberto (do inglês *Open Book*) é um livro amplamente disponível na Internet em formato digital, sem custo. No exterior, muitos *open books* estão também disponíveis nas livrarias, para aquisição em formato impresso.

Eu acredito que “inclusão digital” não significa somente permitir o acesso a computadores à parcela mais pobre da população, mas também desmistificar o funcionamento dessa tecnologia e incentivar seu estudo, para fomentar as próximas gerações de técnicos, engenheiros e cientistas, vindas de todas as classes sociais. Nosso país não pode mais se dar ao luxo de desperdiçar pessoas inteligentes somente porque são pobres.

Prof. Carlos Maziero, Dr.

Agradecimentos

Este texto é fruto de alguns anos de trabalho. Embora eu o tenha redigido sozinho, ele nunca teria se tornado uma realidade sem a ajuda e o apoio de muitas pessoas, de várias formas. Em primeiro lugar, agradeço à minha família, pelas incontáveis horas em que me subtraí de seu convívio para me dedicar a este trabalho.

Agradeço também a todos os docentes e estudantes que utilizaram este material, pelas inúmeras correções e sugestões de melhoria. Em particular, meus agradecimentos a Alexandre Koutton, Altair Santin, André Wosniack, Antônio Barros, Antônio Gonçalves, Carlos Roland, Carlos Silla, Diogo Olsen, Dorgival Guedes, Douglas da Costa, Fabiano Beraldo, Francisco Miamoto, Fred Maranhão, Jeferson Amend, Marcos Laureano, Paulo Resende, Rafael Hamasaki, Rafael Obelheiro, Rodrigo Piovezan, Richard Reichardt, Silvana Rossetto, Tadeu Ribeiro Reis, Thayse Solis, Thiago Ferreira, Thiago Vieira, Urlan de Barros e Vagner Sacramento.

Desejo expressar meu mais profundo respeito pelos autores dos grandes clássicos de Sistemas Operacionais, como Andrew Tanenbaum e Abraham Silberschatz, que iluminaram meus passos nesta área e que seguem como referências inequívocas e incontornáveis.

Agradeço à Pontifícia Universidade Católica do Paraná, onde fui professor de Sistemas Operacionais por 13 anos, pelas condições de trabalho que me permitiram dedicar-me a esta empreitada. Também à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, onde trabalhei de 2011 a 2015, e à UFPR, onde trabalho desde 2015, pelas mesmas razões.

Dedico os capítulos sobre segurança computacional deste livro aos colegas docentes e pesquisadores do Departamento de Tecnologias da Informação da Universidade de Milão em Crema, onde estive em um pós-doutorado no ano de 2009, com uma bolsa CAPES/MEC. Os capítulos sobre virtualização são dedicados à equipe ADEPT IRI-SA/INRIA, Université de Rennes 1 - França, na qual pude passar três meses agradáveis e produtivos durante o inverno 2007-08, como professor/pesquisador convidado.

Carlos Maziero

Curitiba PR, Abril de 2019

Sumário

Parte I: Introdução	1
1	Conceitos básicos. 2
1.1	Objetivos de um SO. 2
	<i>Abstração de recursos</i> 3
	<i>Gerência de recursos</i> 4
1.2	Funcionalidades. 5
1.3	Categorias 7
1.4	Um breve histórico dos SOs 9
2	Estrutura de um SO 13
2.1	Elementos do sistema operacional 13
2.2	Elementos de hardware 15
	<i>Arquitetura do computador</i> 15
	<i>Interrupções e exceções</i> 17
	<i>Níveis de privilégio</i> 20
2.3	Chamadas de sistema. 21
3	Arquiteturas de SOs 27
3.1	Sistemas monolíticos 27
3.2	Sistemas micronúcleo. 28
3.3	Sistemas em camadas. 30
3.4	Sistemas híbridos 31
3.5	Arquiteturas avançadas 32
	<i>Máquinas virtuais</i> 32
	<i>Contêineres</i> 33
	<i>Sistemas exonúcleo</i> 34
	<i>Sistemas uninúcleo</i> 35
Parte II: Gestão de tarefas	39
4	O conceito de tarefa 40
4.1	Objetivos. 40
4.2	O conceito de tarefa. 41
4.3	A gerência de tarefas 42
	<i>Sistemas monotarefa</i> 42
	<i>O monitor de sistema</i> 43

	<i>Sistemas multitarefas</i>	44
	<i>Sistemas de tempo compartilhado</i>	44
4.4	Ciclo de vida das tarefas	47
5	Implementação de tarefas	51
5.1	Contextos	51
5.2	Trocas de contexto	52
5.3	Processos	54
	<i>O conceito de processo</i>	54
	<i>Gestão de processos</i>	55
	<i>Hierarquia de processos</i>	57
5.4	Threads	58
	<i>Definição de thread</i>	58
	<i>Modelos de threads</i>	59
	<i>Programando com threads</i>	62
5.5	Uso de processos <i>versus threads</i>	65
6	Escalonamento de tarefas	70
6.1	Tipos de tarefas	70
6.2	Objetivos e métricas	71
6.3	Escalonamento preemptivo e cooperativo	72
6.4	Algoritmos de escalonamento de tarefas	72
	<i>First-Come, First Served (FCFS)</i>	73
	<i>Round-Robin (RR)</i>	74
	<i>Shortest Job First (SJF)</i>	75
	<i>Shortest Remaining Time First (SRTF)</i>	76
	<i>Escalonamento por prioridades fixas (PRIOc, PRIOp)</i>	77
	<i>Escalonamento por prioridades dinâmicas (PRIOd)</i>	79
	<i>Definição de prioridades</i>	81
	<i>Comparação entre os algoritmos apresentados</i>	82
	<i>Outros algoritmos de escalonamento</i>	82
6.5	Escalonadores reais	83
7	Tópicos em gestão de tarefas	87
7.1	Inversão e herança de prioridades	87
	Parte III: Interação entre tarefas	92
8	Comunicação entre tarefas	93
8.1	Objetivos	93
8.2	Escopo da comunicação	94
8.3	Aspectos da comunicação	95
	<i>Comunicação direta ou indireta</i>	95
	<i>Sincronismo</i>	95
	<i>Formato de envio</i>	97
	<i>Capacidade dos canais</i>	99
	<i>Confiabilidade dos canais</i>	99
	<i>Número de participantes</i>	101

9	Mecanismos de comunicação	104
9.1	Pipes	104
9.2	Filas de mensagens	106
9.3	Memória compartilhada	108
10	Coordenação entre tarefas	113
10.1	O problema da concorrência	113
	<i>Uma aplicação concorrente</i>	113
	<i>Condições de disputa</i>	114
	<i>Condições de Bernstein</i>	116
	<i>Seções críticas</i>	116
10.2	Exclusão mútua	117
	<i>Inibição de interrupções</i>	118
	<i>A solução trivial</i>	118
	<i>Alternância de uso</i>	119
	<i>O algoritmo de Peterson</i>	120
	<i>Operações atômicas</i>	120
10.3	Problemas	122
11	Mecanismos de coordenação	124
11.1	Semáforos	124
11.2	Mutexes	127
11.3	Variáveis de condição	128
11.4	Monitores	130
12	Problemas clássicos	135
12.1	Produtores/consumidores	135
	<i>Solução usando semáforos</i>	136
	<i>Solução usando variáveis de condição</i>	137
12.2	Leitores/escritores	138
	<i>Solução simplista</i>	138
	<i>Solução com priorização dos leitores</i>	140
12.3	O jantar dos selvagens	141
12.4	O jantar dos filósofos	142
13	Impasses	149
13.1	Exemplo de impasse	149
13.2	Condições para impasses	151
13.3	Grafos de alocação de recursos	152
13.4	Técnicas de tratamento de impasses	153
	<i>Prevenção de impasses</i>	154
	<i>Impedimento de impasses</i>	155
	<i>Deteção e resolução de impasses</i>	156
	Parte IV: Gestão da memória	161
14	Hardware de memória	162
14.1	Tipos de memória	162

14.2	A memória física	164
14.3	Espaço de endereçamento	164
14.4	A memória virtual	165
14.5	Memória virtual por partições.	166
14.6	Memória virtual por segmentos.	168
14.7	Memória virtual por páginas	171
	<i>A tabela de páginas.</i>	171
	<i>Flags de status e controle.</i>	173
	<i>Tabelas multiníveis.</i>	174
	<i>Cache da tabela de páginas.</i>	176
14.8	Segmentos e páginas	179
14.9	Localidade de referências	179
15	Uso da memória	185
15.1	Espaço de endereçamento virtual de um processo	185
15.2	A memória de um processo	186
15.3	Alocação de variáveis.	188
	<i>Alocação estática</i>	188
	<i>Alocação automática</i>	189
	<i>Alocação dinâmica</i>	190
15.4	Atribuição de endereços	191
16	Alocação de memória	195
16.1	Alocadores de memória	195
16.2	Alocação básica	196
16.3	Fragmentação	197
	<i>Estratégias de alocação</i>	198
	<i>Desfragmentação</i>	198
	<i>Fragmentação interna</i>	199
16.4	O alocador Buddy.	200
16.5	O alocador Slab	201
16.6	Alocação no espaço de usuário	203
17	Paginação em disco.	206
17.1	Estendendo a memória RAM	206
17.2	A paginação em disco	207
	<i>Mecanismo básico</i>	207
	<i>Eficiência</i>	210
	<i>Critérios de seleção</i>	211
17.3	Algoritmos clássicos	211
	<i>Cadeia de referências</i>	212
	<i>Algoritmo FIFO</i>	212
	<i>Algoritmo Ótimo</i>	212
	<i>Algoritmo LRU.</i>	213
	<i>Algoritmo RANDOM</i>	215
	<i>Comparação entre algoritmos</i>	215

17.4	Aproximações do algoritmo LRU	216
	<i>Algoritmo da segunda chance</i>	217
	<i>Algoritmo NRU</i>	217
	<i>Algoritmo do envelhecimento</i>	218
17.5	Conjunto de trabalho	219
17.6	A anomalia de Belady	221
17.7	Thrashing	222
18	Tópicos em gestão de memória.	227
18.1	Compartilhamento de memória	227
18.2	Copy-on-write (COW)	229
18.3	Mapeamento de arquivo em memória	231
	Parte V: Gestão de entrada/saída	234
19	Hardware de entrada/saída	235
19.1	Introdução	235
19.2	Componentes de um dispositivo	236
19.3	Barramentos de acesso	238
19.4	Interface de acesso	240
19.5	Endereçamento de portas	242
19.6	Interrupções	243
20	Software de entrada/saída.	248
20.1	Introdução	248
20.2	Arquitetura de software de entrada/saída	248
20.3	Classes de dispositivos	249
20.4	<i>Drivers</i> de dispositivos	251
20.5	Estratégias de interação	252
	<i>Interação controlada por programa.</i>	252
	<i>Interação controlada por eventos.</i>	254
	<i>Acesso direto à memória</i>	256
20.6	Tratamento de interrupções	258
21	Dispositivos de armazenamento	261
21.1	Discos rígidos	261
	<i>Estrutura física.</i>	262
	<i>Escalonamento de acessos</i>	263
21.2	Sistemas RAID	268
21.3	Dispositivos de estado sólido	274
	<i>Memória flash</i>	274
	<i>Estrutura de um SSD</i>	275
	<i>Camada de tradução flash</i>	277
	<i>Estratégia de escrita e apagamento.</i>	277
	<i>Nivelamento de desgaste</i>	278
	<i>O comando TRIM</i>	280
	<i>Amplificação de escritas</i>	281
	<i>Provisionamento em excesso</i>	282

21.4	Interface de acesso	282
------	-------------------------------	-----

Parte VI: Gestão de arquivos **286**

22	O conceito de arquivo	287
22.1	Elementos básicos.	287
22.2	Atributos e operações.	288
22.3	Formatos de arquivos.	290
	<i>Sequência de bytes</i>	290
	<i>Arquivos de registros</i>	290
	<i>Arquivos de texto</i>	291
	<i>Arquivos de código</i>	292
	<i>Identificação de conteúdo</i>	293
22.4	Arquivos especiais	294
23	Uso de arquivos.	297
23.1	Introdução	297
23.2	Interface de acesso	297
	<i>Descritores de arquivos</i>	299
	<i>A abertura de um arquivo</i>	299
23.3	Formas de acesso	300
	<i>Acesso sequencial</i>	300
	<i>Acesso aleatório</i>	301
	<i>Acesso mapeado em memória</i>	301
	<i>Acesso indexado</i>	301
23.4	Compartilhamento de arquivos	302
	<i>Travas em arquivos</i>	302
	<i>Semântica de acesso</i>	303
23.5	Controle de acesso	305
23.6	Interface de acesso	306
24	Sistemas de arquivos	310
24.1	Introdução	310
24.2	Arquitetura geral	310
24.3	Espaços de armazenamento	312
	<i>Discos e partições</i>	312
	<i>Montagem de volumes</i>	313
24.4	Gestão de blocos	315
	<i>Blocos físicos e lógicos</i>	315
	<i>Caching de blocos</i>	316
24.5	Alocação de arquivos.	317
	<i>Alocação contígua</i>	318
	<i>Alocação encadeada simples</i>	320
	<i>Alocação encadeada FAT</i>	321
	<i>Alocação indexada simples</i>	322
	<i>Alocação indexada multinível</i>	324
	<i>Alocação por extensões</i>	327
	<i>Análise comparativa</i>	329

24.6	Gestão do espaço livre	329
24.7	Falhas e recuperação	330
	<i>Verificação do sistema de arquivos</i>	331
	<i>Sistemas de arquivos com registro (journal)</i>	332
	<i>Sistemas de arquivos copy-on-write (CoW)</i>	333
24.8	Exemplo: o sistema de arquivos Ext4.	333
25	Diretórios e atalhos	339
25.1	Diretórios	339
25.2	Caminhos de acesso	341
25.3	Implementação de diretórios	342
25.4	Atalhos	343
25.5	Implementação de atalhos	344
25.6	Tradução dos caminhos de acesso.	346

Parte VII: Segurança **350**

26	Conceitos básicos de segurança	351
26.1	Propriedades e princípios de segurança	351
26.2	Ameaças	353
26.3	Vulnerabilidades	354
26.4	Ataques	356
26.5	Malwares.	358
26.6	Infraestrutura de segurança	359
27	Fundamentos de criptografia	364
27.1	Terminologia.	364
27.2	Cifradores, chaves e espaço de chaves	365
27.3	O cifrador de Vernam-Mauborgne	366
27.4	Criptografia simétrica	368
	<i>Cifradores de substituição e de transposição</i>	368
	<i>Cifradores de fluxo e de bloco</i>	371
27.5	O acordo de chaves de Diffie-Hellman-Merkle	373
27.6	Criptografia assimétrica	375
27.7	Criptografia híbrida.	377
27.8	Resumo criptográfico.	378
27.9	Assinatura digital.	380
27.10	Certificado de chave pública.	381
27.11	Infraestrutura de chaves públicas.	382
28	Autenticação	386
28.1	Introdução	386
28.2	Usuários e grupos.	386
28.3	Estratégias de autenticação	387
28.4	Senhas	388
28.5	Senhas descartáveis.	389
28.6	Técnicas biométricas	390
28.7	Desafio/resposta.	392

28.8	Certificados de autenticação	393
28.9	Infraestruturas de autenticação	394
28.10	Kerberos	395
29	Controle de acesso	399
29.1	Terminologia.	399
29.2	Políticas, modelos e mecanismos	399
29.3	Políticas discricionárias.	401
	<i>Matriz de controle de acesso</i>	<i>401</i>
	<i>Tabela de autorizações</i>	<i>402</i>
	<i>Listas de controle de acesso.</i>	<i>403</i>
	<i>Listas de capacidades</i>	<i>404</i>
29.4	Políticas obrigatórias	405
	<i>Modelo de Bell-LaPadula.</i>	<i>406</i>
	<i>Modelo de Biba</i>	<i>406</i>
	<i>Categorias</i>	<i>408</i>
29.5	Políticas baseadas em domínios e tipos.	408
29.6	Políticas baseadas em papéis	410
29.7	Mecanismos de controle de acesso	411
	<i>Infraestrutura básica</i>	<i>412</i>
	<i>Controle de acesso em UNIX.</i>	<i>413</i>
	<i>Controle de acesso em Windows</i>	<i>415</i>
	<i>Outros mecanismos</i>	<i>415</i>
29.8	Mudança de privilégios	417
30	Mecanismos de auditoria	428
30.1	Introdução	428
30.2	Coleta de dados	428
30.3	Análise de dados	430
30.4	Auditoria preventiva	431
	Parte VIII: Virtualização	434
31	O conceito de virtualização	435
31.1	Um breve histórico	435
31.2	Interfaces de sistema	436
31.3	Compatibilidade entre interfaces	437
31.4	Virtualização de interfaces	439
31.5	Virtualização versus abstração	441
32	Tipos de máquinas virtuais	443
32.1	Critérios de classificação	443
32.2	Máquinas virtuais de sistema	444
32.3	Máquinas virtuais de sistema operacional	446
32.4	Máquinas virtuais de processo	448

33	Construção de máquinas virtuais	452
33.1	Definição formal	452
33.2	Suporte de hardware	454
33.3	Níveis de virtualização	456
33.4	Técnicas de virtualização	458
	<i>Emulação completa</i>	458
	<i>Virtualização da interface de sistema</i>	459
	<i>Tradução dinâmica</i>	459
	<i>Paravirtualização</i>	460
33.5	Aspectos de desempenho	462
33.6	Migração de máquinas virtuais	463
34	Virtualização na prática	466
34.1	Aplicações da virtualização	466
34.2	Ambientes de máquinas virtuais	467
	<i>VMware</i>	468
	<i>Xen</i>	468
	<i>QEMU</i>	469
	<i>KVM</i>	470
	<i>Docker</i>	471
	<i>JVM</i>	471
	<i>FreeBSD Jails</i>	472
	<i>Valgrind</i>	473
	<i>User-Mode Linux</i>	473
	Apêndices	475
A	O descritor de tarefa do Linux	476