

**Projeto de Redes para Suporte de Aplicações de  
Vídeo Distribuído**

*Cristiane Maria Reis Franco*

**Dissertação de Mestrado**

# Projeto de Redes para Suporte de Aplicações de Vídeo Distribuído

Cristiane Maria Reis Franco

Julho de 1997

## **Banca Examinadora:**

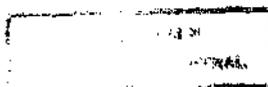
- Nelson Luís Saldanha da Fonseca, PhD (Orientador) <sup>1</sup>
- Edson dos Santos Moreira, PhD <sup>2</sup>
- Edmundo Madeira, Doutor<sup>1</sup>
- Paulo Lício Geus, PhD (Suplente) <sup>1</sup>

---

Dissertação apresentada ao Instituto de Computação da UNICAMP como  
requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação

---

1. Professor do Instituto de Computação - UNICAMP  
2. Professor do ICMSC- USP



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	U/Unicamp
F848p	
V. Ex.	
TEMPO BC/	32474
PROC.	281197
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$11,00
DATA	16/12/97
N.º CPD	

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DO IMECC DA UNICAMP**

Franco, Cristiane Maria Reis

F848p Projeto de redes para suporte de aplicações de vídeo distribuído /  
Cristiane Maria Reis Franco -- Campinas, [S.P. :s.n.], 1997.

Orientador : Nelson Luís Saldanha da Fonseca

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas,  
Instituto de Computação.

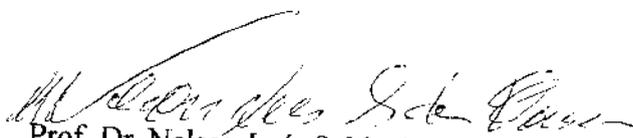
1. Redes de computadores. 2. Sistemas multimídia. I. Fonseca,  
Nelson Luís Saldanha da. II. Universidade Estadual de Campinas.  
Instituto de Computação. III. Título.

CM-00104135-3

# Projeto de Redes para Suporte de Aplicações de Vídeo Distribuído

Este exemplar corresponde à redação final da dissertação devidamente corrigida e defendida pela Sra. Cristiane Maria Reis Franco e aprovada pela Comissão Julgadora.

Campinas, 28 de julho de 1997.



Prof. Dr. Nelson Luís Saldanha da Fonseca  
*Orientador*

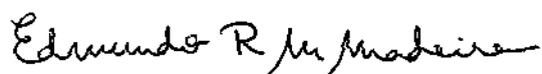
Dissertação apresentada ao Instituto de Computação, UNICAMP, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Tese de Mestrado defendida e aprovada em 28 de julho de 1997  
pela Banca Examinadora composta pelos Professores Doutores



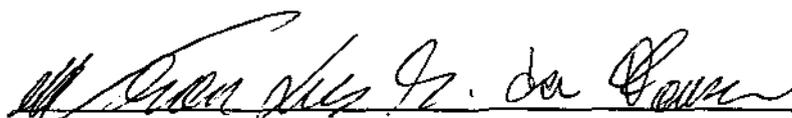
---

Prof. Dr. Edson dos Santos Moreira



---

Prof. Dr. Edmundo Roberto Mauro Madeira



---

Prof. Dr. Nelson Luiz Saldanha Fonseca

---

# Agradecimentos

*"Thanks cannot pay what kindness freely gives"*

Jonh Masefield

---

Ao criador, pela permissão.

À minha família, pelo incentivo.

Ao meu orientador, prof. Nelson Fonseca, pela forma com que conduziu o trabalho.

Aos colegas de mestrado, pela companhia.

Ao Nivando e ao Neucimar, pela cumplicidade .

Ao Frank Schaffa (IBM Research Center), pela cooperação.

Ao CNPq e à FAPESP, pelo apoio financeiro.

Ao CENAPAD-SP, pelo apoio computacional.

---

## *Dedicatória*

*"Aimer ce n'est pas se regarder l'un  
l'autre, c'est regarder ensemble dans  
la même direction"*

(O amor não é olhar-se um ao outro,  
é olhar juntos a mesma direção)

*Saint-Exupéry*

---

Ao Ricardo, pelo incentivo constante,  
pela compreensão infinita,  
pelo companheirismo....

---

---

# Tese

---

*“A tese é, em primeira mão, uma descoberta da arquitetura reflexiva presente em toda a investigação; logo, a ciência como atividade transforma-se na faina artística que inventa para revelar as dimensões invisíveis, incógnitas, submersas, recônditas, múltiplas, sensíveis, complexas. Ciência e arte dialogando concretamente no dia a dia de cada página que se volta nos fichamentos bibliográficos, em todo conhecimento compilado na tradução de uma hipótese, na ousadia de uma montagem metodológica, na humildade de quem desconfia do que descobriu, na segurança de poder ir além: descoberta como invenção, resposta contida na pergunta e, sobretudo, o praser do jogo. A tese tem algo a ver com a invenção. Uma receita às avessas: a descoberta. “*

Lucrécia D’Aléssio Ferrara

---

## *Resumo*

---

As aplicações de vídeo apresentam grande potencial de sucesso comercial na futura Rede Digital de Serviços Integrados de Faixa Larga (RDSI-FL) . Estas aplicações serão também as maiores consumidoras de banda passante neste novo ambiente. Sendo assim, a compreensão dos requisitos para se prover serviços de vídeo é de suma importância para o projeto eficiente da rede.

Esta dissertação estuda *Distributed Home Theatre* (DHT), um serviço de vídeo que permite que usuários geograficamente dispersos discutam um filme. Investiga-se aqui o compromisso existente entre a redução da banda passante e a replicação de repositórios de vídeo no projeto de redes para o fornecimento de serviços de DHT. São propostas funções de custo que permitem a avaliação deste compromisso utilizando-se de valores reais. Vários cenários são analisados: Redes *sem* compartilhamento de fluxo, Redes *com* compartilhamento de fluxo, Redes com servidores distribuídos e Redes com servidores distribuídos e compartilhamento de fluxo. Técnicas de replicação de *cache/* servidor são investigadas e avaliadas frente a parâmetros tais como a distribuição dos usuários e o número de usuários por sessão DHT. A análise é estendida para incluir redes com serviços de Vídeo sob Demanda e *Distributed Home Theatre*.

---

## *Abstract*

---

Video services is both a major business driver and a bandwidth consumer for the future broadband integrated network (B-ISDN). Understanding different video services requirements is of paramount importance for network design.

In this dissertation we study Distributed Home Theatre (DHT), a video service which allows distributed users to debate a filme. We investigate the tradeoff between bandwidth reduction and program replication in the network design for the provision of the DHT services. We propose a framework to analyze this tradeoff for real costs. We analyze different network scenarios: networks without stream sharing, networks with stream sharing, networks with distributed servers and networks with distributed servers and stream sharing. Server/cache replication techniques are investigated and evaluated under different user distribution and different number of users per DHT session. Moreover, we analyze networks with both DHT and video on demand services.

---

## *Conteúdo*

---

*Agradecimentos i*

*Dedicatória ii*

*Pensamento iii*

*Resumo iv*

*Abstract v*

*Conteúdo vi*

*Lista de Figuras viii*

*Lista de Tabelas xi*

---

**INTRODUÇÃO 1**

**CAPÍTULO 1 Aspectos de Sistemas de Vídeo sob Demanda 4**

**1.1 Arquitetura do Sistema de Vídeo sob Demanda 5**

- Rede de Acesso 8*
- Head End 11*
- Rede de Comunicação 11*
- Servidor de Vídeo 12*

**1.2 Interatividade do Usuário com o Sistema 12**

**1.3 Questões de Projeto de Servidores de Vídeo 15**

**CAPÍTULO 2 Projeto de Redes para o Fornecimento de Serviços de DHT 17**

**2.1 Serviços de DHT 18**

- Modelo da Rede de Comunicação 19*
- Distribuição dos Usuários 20*
- Metodologia de Investigação 20*

**2.2 Redes de Comunicação sem Compartilhamento de Fluxo (RSCF) 21**

- Custo de Largura de Banda 22*
- Custo de Armazenamento 23*
- Custo Total 24*
- Replicação de Servidor 24*
- Caching de Programas 30*
- Redes com Serviços de DHT e VOD 33*
- Principais Resultados para RSCF 35*

**2.3 Redes de Comunicação com Compartilhamento de Fluxo (RCCF) 36**

- Custos 36*
- Caching de Programas 42*
- RCCF com Serviços de VOD e DHT 45*
- Principais Resultados para RCCF 46*

**2.4 Redes com Servidores Distribuído (RCSD) 47**

- Replicação de Servidores 47*
- Caching 53*
- Principais Resultados para RCSD 54*

**2.5 Redes com Compartilhamento de Fluxo e Servidores Distribuídos (RCFSD) 54**

- Replicação de Servidores 55*
- Principais Resultados das RSDCF 62*

**CAPÍTULO 3 Conclusões 63**

**Apêndice 65**

**Referências Bibliográficas 71**

---

## *Lista de Figuras*

- 
- Figura 1.1      Arquitetura do Sistema de VOD    5
- Figura 1.2:    Arquitetura de um STB    6
- Figura 1.3:    Rede de TV a Cabo    9
- Figura 1.4:    Estrutura da Rede HFC    10
- Figura 1.5:    Divisão de canais em uma rede HFC    11
- Figura 1.6:    Ilustração do modelo NVOD    13
- Figura 1.7:    Ilustração do modelo PVOD    14
- Figura 2.1      Exemplo de uma sessão DHT (Figura 2.1.a) e detalhe do STB do usuário C durante a sessão de DHT (Figura 2.1.b). 18
- Figura 2.2:    Modelo da Rede    19
- Figura 2.3:    Exemplo de uma rede com fluxo individual de vídeo (RSCF) para cada usuário da sessão de DHT.    22
- Figura 2.4:    Custo normalizado de banda passante em RSCF x profundidade normalizada para: i) diferentes números de usuários por sessão DHT, ii) distribuição uniforme (Figura 2.4.a), iii) distribuição normal com  $s=150,0$  (Figura 2.4.b) e iv) distribuição normal por *head end* com  $s=10,0$  (Figura 2.4.c)    26
- Figura 2.5:    Um exemplo da computação do custo total, em RSCF, considerando replicação de servidores para uma distribuição normal com  $s=150$  e 5 usuários por sessão DHT    27
-

- Figura 2.6: Custo total normalizado em RSCF x profundidade normalizada para i) números diferentes de usuários por sessão DHT, ii) distribuição uniforme (Figura 2.6.a), iii) distribuição normal com  $s=150$  (Figura 2.6.b) e iv) distribuição normal por *head end* com  $s=10.0$  (Figura 2.6.c) 28
- Figura 2.7: Custo total em RSCF x profundidade normalizada x r para i) 5 usuários por sessão, ii) distribuição uniforme (Figura 2.7.a) e iii) distribuição normal por *head end* com  $s=5.0$  (Figura 2.7.b) 29
- Figura 2.8: Custo total normalizado em RSCF x profundidade normalizada para topologias diferentes 29
- Figura 2.9: Custo normalizado de *cache* em RSCF x profundidade normalizada para : i) tamanhos diferentes de *cache*, ii) 5 usuários por sessão de DHT, iii) distribuição uniforme (Figura 2.9.a), iv) distribuição normal com  $s=110.0$  (Figura 2.9.b) e v) distribuição normal por *head end* com  $s=5.0$  (Figura 2.9.c) 32
- Figura 2.10: Custo total normalizado em RSCF x profundidade normalizada considerando-se replicação de servidor em uma rede com serviços de VOD e DHT para: i) 5 usuários por sessão, ii) distribuição uniforme (Figura 2.10.a), iii) distribuição normal com  $s=110.0$  (Figura 2.10.b) e iv) distribuição normal por *head end* com  $s=5.0$  (Figura 2.10.c). 35
- Figura 2.11: Exemplo de uma rede com compartilhamento de fluxo de vídeo (RCCF) 36
- Figura 2.12: Custo normalizado de largura de banda em RCCF x profundidade normalizada para: i) número diferente de usuários por sessão, ii) distribuição uniforme (Figura 2.12.a), iii) distribuição normal geral com  $s=150$  (Figura 2.12.b), e iv) distribuição normal por *head end* com  $s=10$  (Figura 2.12.c). 37
- Figura 2.13: Custo total normalizado em RCCF x profundidade normalizada para: i) número diferente de usuários por sessão de DHT, ii) distribuição uniforme, iii) distribuição normal com  $s=150$  e iv) distribuição normal por *head end* com  $s=10$ . 39
- Figura 2.14: Comparação dos custos totais de replicação das políticas de RCCF e RSCF, para i) distribuição uniforme (Figura 2.14.a), ii) distribuição normal geral com  $s=150$  (Figura 2.14.b) e iii) distribuição normal por *head end* com  $s=10$  (Figura 2.14.c). 40
- Figura 2.15: Custo total normalizado x profundidade normalizada para RCCF x r para i) 5 usuários por sessão DHT, ii) distribuição uniforme (Figura 2.15.a) e iii) distribuição normal por *head end* com  $s=10.0$  (Figura 2.15.b) 41
- Figura 2.16: Custo total normalizado em RCCF x profundidade normalizada, para topologias diferentes. 42
- Figura 2.17: Custo total de *cache* em RCCF x profundidade normalizada para: i) tamanhos diferentes de *cache*, ii) 5 usuários por sessão DHT, iii) distribuição uniforme (Figura 2.17.a), iv) distribuição normal com  $s=110$  (Figura 2.17.b) e v) distribuição normal por *head end* com  $s=5$  (Figura 2.17.c). 43
- Figura 2.18: Comparação dos custos totais da replicação de *cache* para as políticas de RCCF e RSCF, 2000 programas no *cache* e 5 usuários/DHT, para i) distribuição uniforme (Figura 2.18.a), ii) distribuição normal com  $s=150$  (Figura 2.18.b) e iii) distribuição normal por *head end* com  $s=10.0$  (Figura 2.18.c). 44
- Figura 2.19: Custo total normalizado em RCCF x profundidade normalizada considerando a replicação de servidores com serviços de VOD e DHT para: i) 5 usuários por sessão de DHT, ii) distribuição uniforme (Figura 2.19.a), iii) distribuição normal com  $s=110$  (Figura 2.19.b) e iv) distribuição normal por *head end* com  $s=5$  (Figura 2.19.c). 46

- Figura 2.20: Exemplo de uma rede com servidores distribuídos (RCSD) e replicação de servidores no nível 2. 47
- Figura 2.21: Custo total normalizado x profundidade normalizada, para uma rede com servidores distribuídos. 48
- Figura 2.22: Comparação do custo total de replicação das RSCF e das RCSD para: i) 5 usuários por sessão, ii) distribuição uniforme (Figura 2.22.a), iii) distribuição normal com  $s=150$  (Figura 2.22.b) e iv) distribuição normal por *head end* com  $s=10.0$  (Figura 2.22.c). 49
- Figura 2.23: Comparação dos custos totais para as políticas de RSCF e RCSD, para  $C=1.5$ , diferentes números de usuários e i) distribuição uniforme (Figura 2.23.a), ii) distribuição normal geral com  $s=150.0$  (Figura 2.23.b) e iii) distribuição normal por *head end* com  $s=10.0$  (Figura 2.23.c) 50
- Figura 2.24: Comparação dos custos totais para RSCF, RCCF e RCSD, para i) 5 usuários por sessão de DHT, ii) distribuição uniforme (Figura 2.24.a), iii) distribuição normal com  $s=150$  (Figura 2.24.b) e iv) distribuição normal por *head end* com  $s=10$  (Figura 2.24.c). 52
- Figura 2.25: Custo total da rede x profundidade normalizada x  $r$  para RCSD. 52
- Figura 2.26: Custo total em RCSD x profundidade normalizada, para topologias diferentes. 53
- Figura 2.27: Custo normalizado de replicação de *cache* em RCSD x profundidade normalizada para tamanhos diferentes de *cache*. 54
- Figura 2.28: Exemplo de uma rede com servidores distribuídos e compartilhamento de fluxo para replicação de servidor no nível 1. 55
- Figura 2.29: Custo normalizado de largura de banda em RSDCF x profundidade normalizada considerando a replicação de servidores para: i) diferentes números de usuários por sessão de DHT, ii) distribuição uniforme (Figura 2.29.a), iii) distribuição normal com  $s=150$  (Figura 2.29.b) e iv) distribuição normal por *head end* com  $s=10$  (Figura 2.29.c). 57
- Figura 2.30: Custo total normalizado em RSDCF x profundidade normalizada considerando a replicação de servidores para: i) diferentes números de usuários por sessão de DHT, ii) distribuição uniforme (Figura 2.30.a), iii) distribuição normal com  $s=150$  (Figura 2.30.b) e iv) distribuição normal por *head end* com  $s=10$  (Figura 2.30.c) 58
- Figura 2.31: Comparação dos custos totais das RSCF e das RSDCF, para i) 5 usuários por sessão de DHT, ii) distribuição uniforme (Figura 2.31.a), iii) distribuição normal com  $s=150$  (Figura 2.31.b) e iv) distribuição normal por *head end* com  $s=10$  (Figura 2.31.c). 59
- Figura 2.32: Comparação dos custos totais para RSCF, RCCF, RCSD e RSDCF x profundidade normalizada, para i) 5 usuários por sessão DHT. ii) distribuição uniforme (Figura 2.32.a), ii) distribuição normal com  $s=150.0$  (Figura 2.32.b) e iii) distribuição normal por *head end* com  $s=10.0$  (Figura 2.32.c) 60
- Figura 2.33: Custo total da rede x profundidade normalizada x  $r$  para RSDCF. 61
- Figura 2.34: Custo total em RSDCF x profundidade normalizada, para topologias diferentes 61

---

## Introdução

*"Farsighted people in the media industries are terrified of the World Wide Web. Every home is potentially a video conferencing center, every business is potentially a global marketer. A single twisted idea and a rudimentary sense of layout can transform a voiceless outcast into a cult publisher. Now, that's interactivity!"*

N. Y. Times Article by Steven Levy. September, 24, 1995.

---

O advento da integração de tráfego possibilitou a concepção de inúmeras aplicações multimídia. Dentre as aplicações mais promissoras comercialmente encontram-se a vídeo conferência e o vídeo sob demanda. A vídeo conferência é uma extensão da áudio conferência na qual seus participantes podem trocar informações visuais. Os usuários de um sistema de vídeo sob demanda podem selecionar e assistir filmes armazenados em repositórios de filmes. Este trabalho estuda "*Distributed Home Theatre (DHT)*", uma aplicação híbrida na qual um filme<sup>1</sup> é simultaneamente exibido aos participantes de uma vídeo conferência, permitindo assim que um grupo distribuído de usuários discuta sobre o conteúdo de um filme. Em uma sessão de DHT qualquer participante pode iniciar um debate sobre uma cena específica através da execução de comandos de VCR. Espera-se que a aplicação "*Distributed Home Theatre*" seja de grande utilidade no ensino a distância bem como nas teleconferências profissionais [16], [14], [18], [23].

---

1. Nesta dissertação os termos filme e programa são usados com o mesmo significado: fluxo digital de vídeo de alta definição.

As aplicações baseadas em vídeo serão as maiores consumidoras de banda passante nas futuras Rede Digitais de Serviços Integrados de Faixa Larga (RDSI-FL). Como por exemplo, menciona-se a distribuição dos serviços de vídeo sob demanda nos Estados Unidos onde existem aproximadamente 77.000.000 residências com televisores ligados durante o horário nobre [2]. Considerando-se taxas de transmissão de 6 Mb/s para o padrão MPEG-II NTSC, 10 Mb/s para JPEG NTSC, e 20 Mb/s para HDTV, os requisitos de largura de banda são respectivamente de 462 Tb/s, 770 Tb/s e de 1.54 Pb/s, o que está muito além da capacidade de transmissão das redes de comunicação num futuro próximo [22].

A presente dissertação investiga o projeto de redes de comunicação explorando o compromisso entre a redução de largura de banda e a replicação de servidor para o fornecimento das aplicações de *Distributed Home Theatre* (DHT). A investigação deste compromisso é essencial no projeto de redes que ofereçam serviços de vídeo. Se o custo de largura de banda fosse insignificante, teria-se um servidor central (ou servidores) fornecendo filmes para toda a comunidade da rede. Se ao contrário, o custo de servidor fosse zero, teria-se um repositório completo de vídeo na residência de cada usuário. Obviamente, nenhuma destas abordagens é realista. Os recursos atuais da rede estão longe de fornecer a demanda de largura de banda gerada pela solução de um servidor central e os servidores de vídeo são mais complexos e mais caros do que os atuais computadores pessoais. Assim sendo, uma solução para aliviar os requisitos de largura de banda consiste na replicação de servidores/*caches* em alguns nós da árvore de distribuição. De forma a avaliar os resultados supra-citados uma função de custo é introduzida.

A estratégia de replicação de servidores/*cache* é avaliada em cenários que incluem diferentes distribuições de usuários e diferentes números de usuários por sessão. Vários tipos de redes também são avaliados de forma a permitir um melhor entendimento na escolha do projeto adequado: i) redes *sem* compartilhamento de fluxo (RSCF), ii) redes *com* compartilhamento de fluxo (RCCF), redes com servidores distribuídos (RCSD) e redes com servidores distribuídos e compartilhamento de fluxo (RSDCF). Nas RSCF existe um fluxo individual de vídeo para cada usuário da sessão de DHT e um único servidor de vídeo, chamado servidor de controle, responsável por transmitir os dados desta sessão. Nas RCCF o fluxo de vídeo é compartilhado pelos usuários de uma sessão DHT até o último *switch* em comum entre eles. Vários servidores diferentes podem estar associados a uma sessão DHT nas RCSD, sendo que o servidor mais próximo de um usuário será responsável pela transmissão do fluxo de vídeo para este usuário. As RSDCF são uma combinação das RCCF e RCSD. Aqui também uma sessão DHT pode ter vários servidores associados a ela, sendo que o fluxo de vídeo é compartilhado até o último *switch* em comum entre os usuários de um servidor.

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: no Capítulo 1 os principais conceitos de sistemas de VOD são introduzidos. No Capítulo 2 introduz-se o serviço de "*Distributed Home Theatre*" e analisa-se os

resultados das diferentes estratégias de replicação de servidor/*cache* para os quatro tipos de redes adotadas (RCCF, RSCF, RCSD, RSDCF). Finalmente, algumas conclusões são apresentadas no Capítulo 3.

# *Aspectos de Sistemas de Vídeo sob Demanda*

*“O homem sensato se adapta ao mundo;  
o insensato insiste em adaptar o mundo a ele.  
Todo progresso depende portanto do homem  
insensato”*

George Benard Shaw

---

Neste capítulo estuda-se os principais conceitos sobre os serviços de Vídeo sob Demanda (*Video on Demand - VoD*) tais como arquitetura do sistema de VoD, grau de interatividade do usuário com o sistema e projeto de servidores de vídeo.

Vídeo sob Demanda (*VOD - Video on Demand*) é um serviço que possibilita a locação eletrônica de filmes para usuários geograficamente dispersos[35]. O usuário ou assinante pode requisitar em tempo real a transmissão de um fluxo de vídeo de uma coleção de vídeos disponíveis. O serviço de VOD permite a seus usuários o acesso a serviços de vídeo tais como filmes, enciclopédias eletrônicas, jogos interativos e vídeos educacionais. Dentre as aplicações multimídia residenciais da futura Rede Digital de Faixa Larga o Vídeo sob Demanda tem sido apontado como a de maior potencial de sucesso comercial [9], [10], [11], [34].

O grau de interatividade do usuário com o sistema de VoD é variável e dependente das características do serviço. De um lado tem-se os serviços de “luxo” que são completamente interativos. Neste caso o filme começa imediatamente após a requisição do usuário e este pode fazer uso das função de VCR (*Video Cassete Recorder*), isto é, o filme pode ser pausado, avançado ou

mesmo retrocedido a qualquer momento. No outro extremo encontra-se o serviço mais barato no qual o usuário deve agendar com certa antecedência o horário de início da programação e pode não ter qualquer acesso a funções de VCR.

Várias questões de projeto de sistemas de VOD têm sido abordadas na literatura. A arquitetura do sistema [5], [11], [10], [39], [25], [19], o grau de interatividade do usuário [11], [20], [35] e o projeto de servidores de vídeo [3], [9], [12], [15], [17], [30], [31], [33], [38] são algumas delas. As seções seguintes discutem estas questões.

## 1.1 Arquitetura do Sistema de Vídeo sob Demanda

Os principais elementos da arquitetura de um sistema de VOD são mostrados na Figura 1.1.

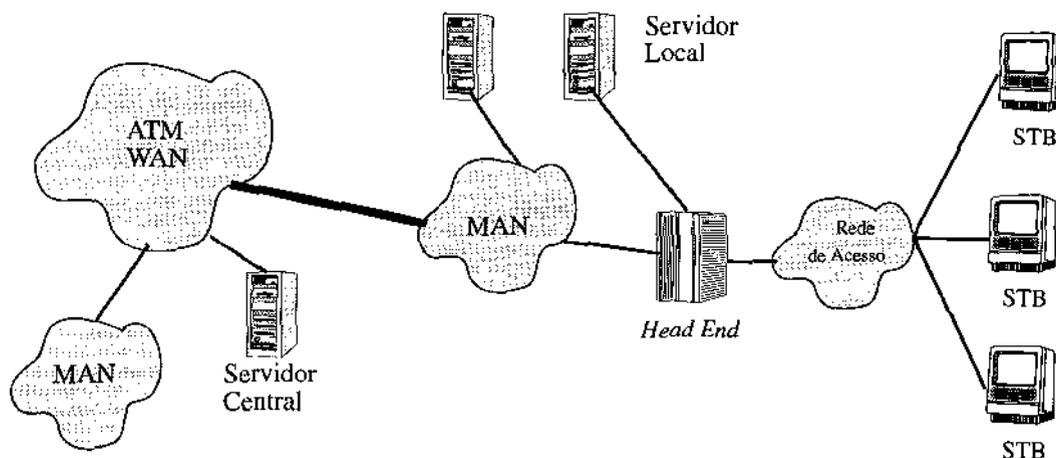


Figura 1.1 Arquitetura do Sistema de VOD

Descreve-se abaixo cada um componentes da arquitetura do sistema:

### 1.1.1 STB (Set Top Box)

Na interface da rede comunitária com o usuário encontra-se um dispositivo chamado *Set Top Box* ou STB. O STB recebe o fluxo de vídeo da rede e o apresenta para o usuário. É através do STB que o usuário se comunica com o sistema, gerando possíveis operações interativas. Algumas destas operações incluem pausa, avanço, retrocedimento, etc. do filme [37]. Uma lista mais completa destas operações é mostrada na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 Operações Interativas

Operação	Descrição
<i>Play/Resume</i>	Inicia o filme desde o começo ou a partir de qualquer outra parte
<i>Stop</i>	Pára o filme, sem imagem e sem som
<i>Pause</i>	Pára temporariamente o filme, com imagem
<i>Jump Forward</i>	Pula para uma parte pré determinada do filme, sem imagem e sem som
<i>Jump Backward</i>	Pula para uma parte pré determinada do filme, sem imagem e sem som
<i>Speed Up</i>	Avança rapidamente o filme para frente, com imagem e som
<i>Slow Down</i>	Avança vagarosamente o filme para frente, com imagem e som
<i>Reverse</i>	Mostra o filme na direção contrária, com imagem e som
<i>Fast Reverse</i>	Move rapidamente o filme na direção contrária, com imagem e som
<i>Slow Reverse</i>	Move lentamente o filme para trás, com imagem e som

Atualmente a forma mais discutida para STB é de um sintonizador de canais conectado ao aparelho de TV [4], [25], [39]. Usando o controle remoto da TV o usuário pode escolher a programação e efetuar operações interativas. Independente da forma, o STB deve executar duas funções: i) enviar, receber e processar os sinais de controle e os comandos do usuário e ii) receber, decodificar e apresentar os quadros de vídeo. Isto significa que o STB deve apresentar uma interface que permita o usuário selecionar seus filmes e executar operações de controle e deve também ser capaz de acomodar as mudanças geradas no fluxo de vídeo por operações interativas. Uma possível arquitetura de um STB é mostrada na Figura 1.2:

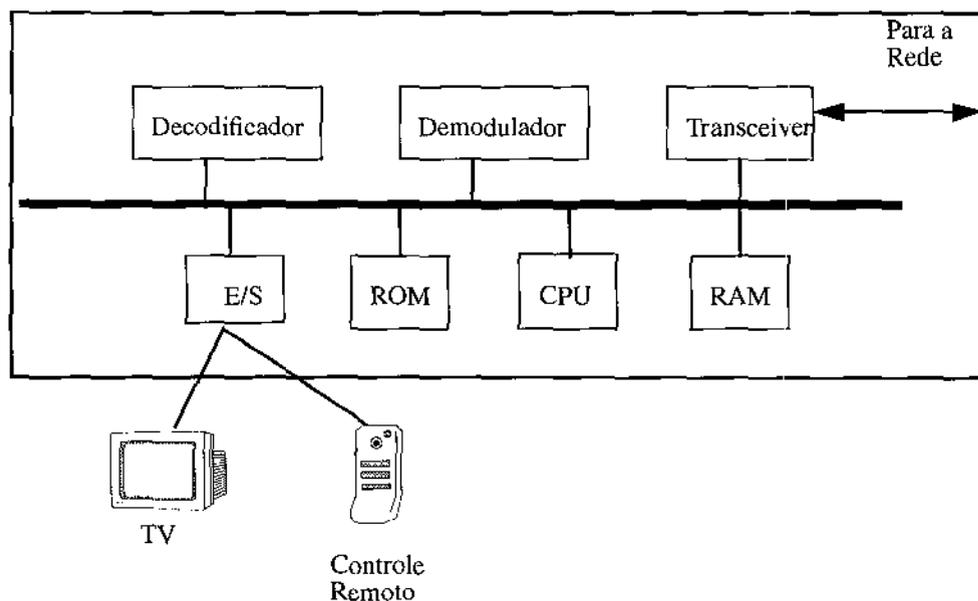


Figura 1.2: Arquitetura de um STB

Na Figura 1.2 o transceiver recebe dados (e.g. células ATM) da rede e permite o envio de sinais de controle para o servidor de vídeo. O sinal que chega ao STB deve ser transformado de banda larga para banda básica e esta é a função do demodulador. Se os dados estiverem encriptados existe uma unidade de descompressão que descripta os dados e faz a descompressão dos quadros de vídeo digital MPEG. O vídeo é então convertido em um sinal NTSC, PAL ou SECAM e enviado para o monitor de TV através da unidade de E/S. O STB possui um microprocessador que irá controlar os vários blocos de hardware, o gerenciamento do controle remoto, a criação de uma interface necessária para a interação do usuário com o sistema e o gerenciamento dos protocolos de comunicação. As unidades de RAM e ROM serão utilizadas para o armazenamento de partes da informação de vídeo. Existe aqui um compromisso entre a quantidade de armazenamento utilizada no STB e o grau de interatividade permitido ao usuário. Quanto maior o grau de interatividade permitido ao usuário maior será a necessidade de armazenamento de partes da informação pelo STB [19], [25]. Os STB podem ser classificados pela quantidade de memória que possuem. A Tabela 1.2 mostra uma possível classificação. Deve-se notar que a complexidade e a interatividade do sistema é proporcional a quantidade de memória nestes dispositivos.

**Tabela 1.2 Opções de memória para um STB**

set-top box	característica	requisitos de memória
memória mínima	armazena menos de um minuto de um filme de duas horas	até 1 MB
memória média	armazena uma porção de um filme de duas horas	1 MB - 1 GB
memória máxima	armazena um filme de duas horas	> 1 GB

Atualmente, estima-se que o custo viável de um STB não deve ultrapassar algumas centenas de dólares. Supondo-se que toda residência que possui hoje um aparelho de TV possuirá também um STB, percebe-se que questões como atualizações, correções de falhas técnicas e padronização devem ser pensadas cuidadosamente. As questões de padronização de STBs são abordadas de forma bastante completa em [39].

Uma outra questão relevante é de quem será o STB. De um lado o provedor do serviço de VOD pode alugar o STB para o usuário, como acontece hoje nos serviços de TV a cabo. Neste caso cada provedor compra um lote grande de uma determinada marca de STB e o aluga para o usuário. Se o usuário mudar de endereço ou trocar de provedor o STB simplesmente é devolvido e o usuário aluga um outro STB do novo provedor. O problema com esta solução é que cada provedor de uma região provavelmente terá um STB diferente o que pode impedir o usuário de acessar a rede e fazer uso de programas de outros provedores do serviço. Em uma segunda abordagem, o usuário compra o STB em uma loja, da mesma forma que um eletrodoméstico comum. O usuário compra o STB de sua preferência podendo escolher características como tamanho, cor, quantidade de

memória, preço, etc. Para que esta abordagem tenha sucesso é necessário que os vários segmentos da indústria concordem com padrões bem definidos. É inviável que o usuário tenha que comprar um novo STB, por motivos de incompatibilidade, cada vez que mude de endereço ou de provedor. Padrões como algoritmos de descompactação e de descompressão e interfaces de *hardware* e de *software* do STB com a rede de comunicação devem ser definidos cuidadosamente para propiciar uma implantação aberta do sistema.

### 1.1.2 Rede de Acesso

A rede de acesso compõe a parte final da estrutura da rede de distribuição. Seu cabeamento é o que realmente chega até a casa do assinante do serviço. É através desta rede que acontece a comunicação do resto do sistema de VOD com a interface do usuário, o STB. Atualmente, a rede de acesso se constitui no maior obstáculo na implantação de serviços multimídia residenciais. A indústria de telecomunicações não tem poupado esforços para apresentar uma solução que seja viável técnica e economicamente. A solução ideal para a rede de acesso provavelmente sairá de uma extensão das estruturas atuais. A instalação de uma estrutura adequada certamente dependerá de fatores como quantidade e qualidade da estrutura já instalada, demanda por serviços de faixa larga, custos da extensão e riscos econômicos do investimento. Uma avaliação técnica e econômica da evolução das redes de acesso pode ser encontrada em [7] e em [27].

As várias tecnologias das redes de acesso são estudadas extensivamente em [6]. Algumas delas incluem o ADSL, o FTTC, o FTTH e o HFC. A tecnologia ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) aproveita a atual estrutura de cabeamento de par trançado para oferecer os serviços de VOD. O ADSL emprega a multiplexação de divisão de frequência para transmitir um sinal de descida (para o usuário) de 1.536 Mbps, um sinal de 16 Kbps de subida (do usuário para o sistema) e um sinal POTS (*Plain Old Telephone Service*) *full duplex*. O termo assimétrico vem do fato de que a banda passante de descida é bem maior que a banda passante de subida. A vantagem desta tecnologia é óbvia: praticamente toda residência tem um cabo telefônico de par trançado chegando a sua porta. Desta forma, aproveita-se uma estrutura já disponível, obtendo um ganho considerável no custo da implantação do serviço. Embora o ADSL venha sendo testado como uma alternativa de tecnologia para o suporte de aplicações residenciais de vídeo, a quantidade de banda passante que ele oferece ainda é baixa para a implantação destes serviços em larga escala.

O FTTC (*Fiber To The Curb*) é uma tecnologia simétrica de fibra ótica. Um laço de fibra ótica é instalado da central de comunicação à residência do usuário pela companhia telefônica. Os laços de fibra ótica são curtos e formam canais *full-dublex* que podem usar os esquemas de portadora T1 ou T2, permitindo a passagem de quadros MPEG-I e MPEG-II. Além disto, a sua simetria favorece a implantação de aplicações que necessitam de banda passante de retorno, como a *Vídeoconferência* e o *Distributed Home Theatre*.

O FTTH (*Fiber To The Home*) aparece como terceira alternativa. Nesta solução a companhia telefônica fornece um cabo de fibra ótica que chega a residência do usuário provendo uma portadora OC-1, OC-3 ou maior. Esta solução é bastante dispendiosa e provavelmente não estará disponível tão cedo. A vantagem é que uma vez disponível abrirá portas para uma enorme quantidade de novas aplicações multimídia.

Ao contrário das três soluções anteriores que são ponto-a-ponto o HFC (*Híbrid Fiber Coax*) é uma solução multiponto. O HFC é uma tecnologia híbrida de fibra ótica e cabo coaxial de banda larga. O HFC aproveita a atual estrutura de cabo coaxial de banda larga, usado nas transmissões de TV a Cabo, para criar um sistema bidirecional capaz de acomodar o tráfego MPEG-I e MPEG-II, permitindo assim a distribuição de serviços multimídia residenciais [24]. A Figura 1.3 mostra a estrutura da rede de TV a cabo. A estrutura é unidirecional e em forma de árvore. Os *head ends* coletam os programas de TV, geralmente recebidos via satélite e os distribui através dos ramos da rede. Os amplificadores são usados para compensar a atenuação do sinal que pode percorrer vários quilômetros até chegar a residência do usuário. Atualmente, tem-se trabalhado nesta estrutura para aumentar a confiabilidade e qualidade do sistema e também diminuir a necessidade de manutenção.

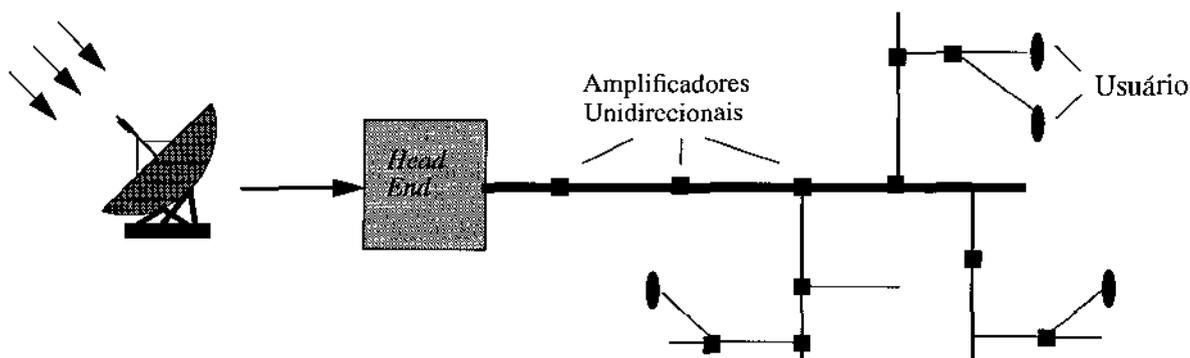


Figura 1.3: Rede de TV a Cabo

Os *backbones* das redes de TV a Cabo estão sendo substituídos por fibra ótica, os amplificadores unidirecionais estão sendo substituídos por bidirecionais e a estrutura resultante é chamada apropriadamente de *Hybrid Fiber Coax* ou HFC. A estrutura da rede HFC é mostrada na Figura 1.4.

Em uma rede HFC, uma parte da estrutura da rede, que conecta o *head end* ao limite de uma comunidade, é substituído por fibra ótica. Isto significa que a confiabilidade da rede aumenta, pois muitos amplificadores não são mais necessários, diminuindo o número de componentes ativos no sistema, bem como a possibilidade de falhas. A qualidade do sinal também é melhorada. Os amplificadores unidirecionais são substituídos por bidirecionais para permitir a implantação de serviços que necessitam de banda passante de

retorno. A conversão dos sinais elétricos em óticos, e vice-versa, é feita pelos *fiber nodes* (fn) que se localizam na interface da rede de fibra ótica com a rede de cabo coaxial de banda larga.

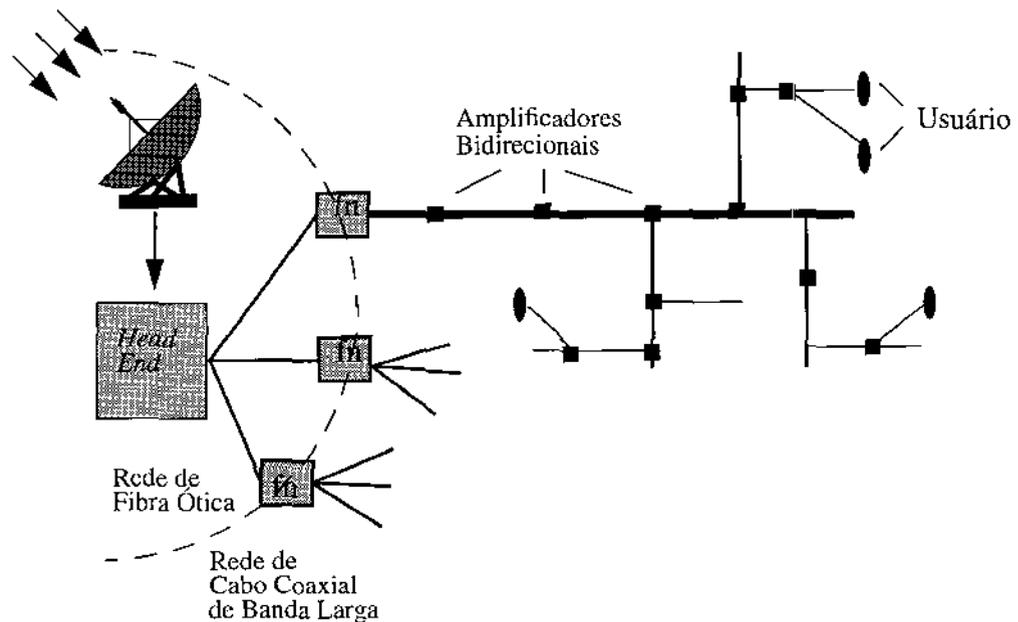


Figura 1.4: Estrutura da Rede HFC

Uma rede HFC é capaz de suportar 125 canais de 6 MHz, 75 dos quais serão usados para transmissões de TV e os canais restantes serão usados para o tráfego multimídia. A Figura 1.5 mostra como é feita a alocação destes canais. A faixa de 5 a 42 MHz é usada para transmissão de retorno. Esta faixa é dividida em canais que variam de algumas centenas de KHz a 1 MHz. Usando a técnica de modulação QPSK (*Quaternary Phase Shift Keying*) pode-se obter taxas de 2 a 3 Mb/s nestes canais. Para manter a compatibilidade, a faixa de 54 a 450 MHz continua sendo usada para transmissões analógicas de TV. O restante da faixa acima de 450 MHz é usado para transmissões digitais de tráfego multimídia. Os 50 canais multimídia são modulados usando QAM e oferecem cerca de 30 Mbps por canal. Se cada *head end* servir 500 residências tem-se um canal de 6 Mbps dedicado para cada usuário, permitindo interatividade completa com o sistema. A comunicação do STB com a rede HFC é feita através do uso dos *cable modems*. Estes dispositivos são similares aos *modems* de voz e fazem a recepção e o envio dos sinais digitais no cabo coaxial de banda larga.

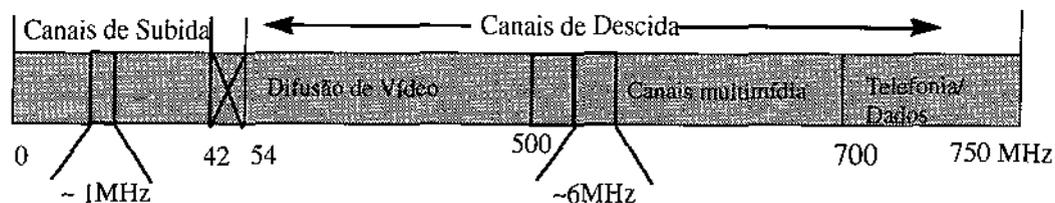


Figura 1.5: Divisão de canais em uma rede HFC

É verdade que a implantação de uma rede HFC requer mudanças na atual estrutura da rede de TV a Cabo. Há quem argumente que a implantação do HFC ainda levará muito tempo e consumirá muito dinheiro. Mas atualmente, 25% da rede de TV a Cabo dos EUA, que chega a 90% da população americana, já foi substituída por HFC e os trabalhos de substituição estão acelerados [8]. No Brasil, onde a rede de TV a Cabo é mais recente, praticamente metade da estrutura instalada já possui canal de retorno. Além disto, o HFC fornece uma alta quantidade de banda passante além de suportar centenas de conexões simultâneas. Sua natureza multiponto também fornece a vantagem de permitir o uso de estratégias de compartilhamento de fluxo. Um ponto importante é a possibilidade de crescimento da rede HFC. Os cabos de fibra ótica podem ser instalados cada vez mais perto do usuário, fornecendo uma maior quantidade de largura de banda e se aproximando da arquitetura FTTC. A disponibilidade de um canal de retorno, um canal analógico e outro digital permitem que a rede HFC sirva uma enorme quantidade de aplicações residenciais que podem variar das tradicionais aplicações de TV a aplicações multimídia altamente sofisticadas. Com todas estas características o HFC, tem sido apontado com a solução mais rápida e viável para a implantação de serviços multimídia residenciais [13], [26]. Todos estes fatores levaram o HFC a ser considerado como a solução adequada para a rede de acesso nesta dissertação.

### 1.1.3 Head End

A principal função do *head end* é receber os sinais da rede comunitária, geralmente através de transmissão via satélite, e distribuí-los para os usuários. É no *head end* que o sinal é modulado para ser transmitido na rede de acesso e demodulado para ser enviado de volta às redes metropolitanas e de longa distância (MANs e WANs). O roteamento da conexão do servidor de vídeo para o usuário também é processado aqui.

### 1.1.4 Rede de Comunicação

A rede de comunicação provê a interconexão dos vários elementos do sistema. Esta interconexão inclui tanto sinalização quanto transmissão de dados. Podem ser usadas tanto conexões ponto-a-ponto quanto

conexões ponto-a-multiponto entre o usuário final e o servidor de vídeo. A rede de comunicação é classificada de acordo com sua abrangência geográfica. Tem-se as redes de longa distância (WAN), as redes metropolitanas (MAN) e as redes de acesso (discutidas na seção 1.1.2).

Devido ao baixo retardo de propagação característico das Redes Digitais de Serviços Integrados de Faixa Larga (RDSI-FL) os repositórios de filmes (servidores) podem estar geograficamente dispersos. Uma das opções mais cotadas para as redes de longa distância (WAN) são as redes ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), que é o padrão adotado para as futuras RDSI-FL.

As redes ATM são uma tecnologia baseada na multiplexação estatística e na transmissão de pequenas unidades de informação de tamanho fixo denominadas células. As redes ATM oferecem serviços com e sem conexão e o roteamento de células é realizado de forma eficiente baseando-se em informações contidas no cabeçalho de cada célula. Tal tecnologia é capaz de suportar diversas Qualidades de Serviço (QoS), satisfazendo assim, requisitos exigidos pelas diferentes aplicações multimídia [28].

### 1.1.5 Servidor de Vídeo

Os servidores de vídeo são dispositivos responsáveis pelo armazenamento dos dados multimídia. Devido à grande quantidade de espaço necessário para armazenar dados multimídia (um filme de duas horas pode chegar a 5 GB usando-se MPEG-II a uma taxa de 6Mb/s), os servidores devem estabelecer políticas de compactação na armazenagem dos dados e de descompactação nos pedidos de *playback*. Os servidores podem combinar diferentes dispositivos, como fitas e discos óticos, de forma a satisfazer a demanda por espaço de armazenamento. O uso de *caches* pode garantir que o fluxo de informação seja rápido o suficiente para que o usuário não perceba nenhuma interrupção no filme requisitado[10]. As questões de projeto de servidores são discutidas com mais detalhes na seção 1.3.

---

## 1.2 Interatividade do Usuário com o Sistema

A complexidade do sistema de VOD é diretamente proporcional ao grau de interatividade oferecido ao usuário. Pode-se dividir os serviços de VOD de acordo com este parâmetro. Abaixo apresenta-se alguns modelos de serviços de VOD, classificados quanto a interatividade oferecida ao usuário:

- **TVOD** (*True Video on Demand*): os usuários podem buscar e controlar individualmente as informações vindas do servidor de vídeo com resposta instantânea a seus controles (por exemplo *fast forward play*). Cada usuário que faz um pedido recebe um canal alocado exclusivamente, permitindo uma interação total com o servidor de vídeo. A vantagem deste modelo é ser completamente interativo. A desvan-

tagem é que o número de usuários que têm seus pedidos satisfeitos é limitado pelo número de canais disponíveis. Uma modificação deste método cria uma fila onde os usuários que não conseguiram ter seus pedidos satisfeitos ficariam bloqueados - TVOD com fila. Este método requer tanto o gerenciamento da fila como também um estudo minucioso para se definir o tempo máximo de espera na fila (MQT - *Maximum Queuing Time*).

- **NVOD (Near Video on Demand)**: consiste na distribuição não-interativa de um número limitado de programas. Este modelo baseia-se na idéia de que certos filmes são bastante populares e que vários usuários podem desejar assistir a esses filmes simultaneamente. Assim, pode-se criar um conjunto de cópias dos filmes mais populares e iniciar uma cópia deste conjunto a cada  $\Delta t$  minutos. Quando um usuário faz um pedido ele tem que esperar no máximo  $\Delta t$  minutos até que sua cópia comece. As vantagens deste método são sua grande simplicidade e seus baixos custos em relação ao método anterior. Como os fluxos são difundidos a uma taxa de transmissão igual a taxa na qual o usuário está assistindo o filme nenhum armazenamento é necessário nos STBs. Uma outra vantagem é a alta disponibilidade deste método que permite a praticamente todos os usuários conectados ao cabo assistir aos filmes que estão passando por ele. Uma desvantagem é que ele gasta um número muito grande de canais. Para um conjunto de filmes de tamanho  $L$ , precisa-se de  $L/\Delta t$  canais. A outra desvantagem é que a interação do usuário se restringe a escolha do filme, e ainda limita esta escolha a um conjunto restrito de filmes. A Figura 1.6 ilustra este modelo.

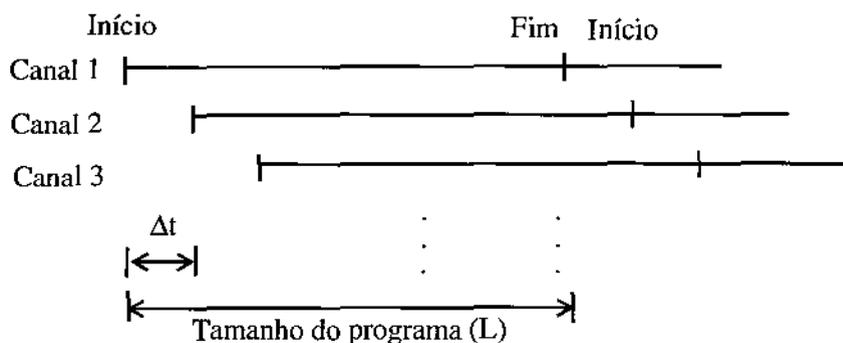


Figura 1.6: Ilustração do modelo NVOD

- **PVOD (Partitioned Video on Demand)**: Este modelo combina os dois modelos anteriores (TVOD e NVOD). Neste modelo os canais são divididos em duas porções: a porção que trabalha no esquema TVOD e a porção que trabalha no esquema NVOD. Os filmes mais populares são colocados na porção NVOD, começando a cada  $\Delta t$  minutos. O resto dos canais são usados para transmissões do tipo TVOD. Os usuários que requisitam filmes que estão sendo fornecidos pela porção NVOD são atendidos por ela, caso contrário ganham um canal da porção TVOD. O maior problema com esta

abordagem é que nem todos os usuários terão acesso à interatividade. Os usuários para os quais foi alocado um canal NVOD não poderão interagir com o sistema. A Figura 1.7 mostra a divisão de canais deste PVOD.

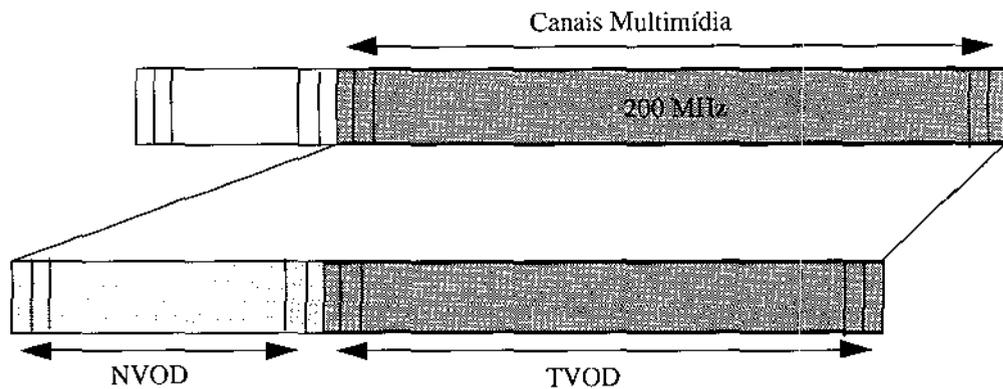


Figura 1.7: Ilustração do modelo PVOD

• **DAVOD** (*Dynamic Allocated Video on Demand*): Este esquema tenta resolver o problema do modelo PVOD onde usuários que foram alocados a parte de NVOD não conseguem obter interação com o sistema. No modelo DAVOD, os usuários que estão na partição NVOD são transferidos para a partição de TVOD no momento que requerem qualquer interação com o sistema. Uma vez transferidos permanecem na partição TVOD até o final da transmissão de sua sessão.

Um dos serviços mais importantes dentre todos os serviços de Vídeo sob Demanda é o Vídeo sob Demanda Interativo (IVOD - *Interactive Video on Demand*). Através deste serviço o usuário ganha acesso a um filme através de uma conexão ponto a ponto. Esta conexão permite que o usuário tenha controle individual e instantâneo sobre o servidor de vídeo em termos de começar, pausar, retroceder e outras operações de VCR. Os modelos TVOD e DAVOD são interativos. O modelo PVOD pode ser interativo dependendo da partição que o usuário se encontra.

Basicamente um sistema de IVOD funciona da seguinte forma:

1. O usuário seleciona um filme entre um conjunto de filmes;
2. A transmissão do filme começa dentro de alguns segundos;
3. O usuário pode executar qualquer operação de VCR, com resposta instantânea do sistema;

Pode-se dividir os serviços de IVOD nos seguintes tipos:

- **SEQ** (*Sequential Access*): Este serviço permite ao usuário requerer o início imediato de um programa multimídia. Esta operação é também a única interação permitida ao usuário com o sistema, além do pedido de fim de sessão. Este serviço se difere do modelo NVOD pelo início *imediato* do programa.
- **VCR** (*Enhanced Sequential Access*): Permite que o usuário pause, avance ou retroceda o programa.
- **RAN** (*Random Access*): Permite ao usuário que “pule” para qualquer ponto do programa multimídia. Este serviço requer que o programa multimídia inteiro esteja disponível para o usuário a um baixo tempo de latência.

### 1.3 Questões de Projeto de Servidores de Vídeo

No projeto de servidores de vídeo o custo de armazenamento representa a maior parte do custo total deste servidor [36]. Um fluxo de vídeo compactado usando MPEG-I requer, aproximadamente, 1.5 Mbps de largura de banda. O mesmo fluxo compactado com MPEG-II requer de duas a três vezes mais. Considerando um filme de 100 minutos isto significa de 1-4 GB para armazenar um único filme. Atualmente o preço de armazenamento gira em torno de US\$ 0.40/MB, o que significa de US\$ 400-1600 por filme armazenado. Para um servidor com 10.000 filmes, um número razoável para uma boa locadora de vídeo, o custo deste servidor seria de US\$ 4 milhões de dólares! Isto sem contar custos do equipamento, da digitalização dos dados, dos direitos autorais dos filmes armazenados, etc. Claramente, o projeto de servidores de vídeo deve ser cuidadosamente elaborado de forma a tornar os serviços multimídia economicamente viáveis. Algumas alternativas incluem servidores de vídeo centralizados [1],[36], servidores centralizados com *caches* distribuídos (replicação de *caches*) [11], servidores hierárquicos distribuídos [10], [3] e servidores completamente replicados [22].

O sistema com servidores centralizados é bastante simples de gerenciar. Todos os pedidos são atendidos por um único servidor central. O problema com esta abordagem é que a carga total do sistema é concentrada em um único ponto. A natureza interativa dos serviços de vídeo requer que os pedidos sejam satisfeitos imediatamente, o que pode ser um problema quando existe um único servidor para servir todos os usuários. Um outro problema é a quantidade de largura de banda necessária para acessar este servidor, além do que este ponto se constitui em um elemento suscetível a falhas no sistema. A introdução de *caches* tenta diminuir a carga nos servidores e reduzir a largura de banda necessária.

As arquiteturas hierárquicas combinam vários dispositivos de armazenamento secundário, como discos magnéticos, e terciários, como fitas magnéticas, com a finalidade de diminuir o custo total de armazenamento dos servidores. Neste caso, a maior parte dos filmes fica armazenada nos dispositivos terciários. Os programas vão sendo transferidos para o armazenamento secundário a medida que vão sendo requisitados. Esta arquitetura tem a vantagem de permitir certo balanceamento de carga, distribuindo os filmes mais populares em um certo

número de dispositivos secundários e balanceando os fluxos direcionados a eles. Em casos de demandas muito altas os dados podem ser replicados nos dispositivos secundários.

O sistema com servidores distribuídos divide a carga do sistema entre vários servidores diferentes, aliviando assim a carga individual de cada um e eliminando pontos de congestionamento da rede. Além disto, esta alternativa diminui o custo total de largura de banda do sistema à medida que os servidores são colocados mais perto dos usuários. Entretanto, este tipo de arquitetura requer um maior gerenciamento. Deve-se decidir quais programas serão colocados em qual servidor, se haverá replicação ou não e, se houver, quantas cópias serão mantidas nos servidores. A replicação total é uma extensão dos servidores distribuídos, onde todos os programas são replicados.

As alternativas acima podem ser combinadas de forma a se adequar as necessidades do sistema. A escolha da melhor arquitetura de servidores depende do compromisso entre o custo de largura de banda e o custo de armazenamento, da infraestrutura já disponível, das necessidades da aplicação, além de outros fatores.

# *Projeto de Redes para o Fornecimento de Serviços de DHT*

*"A imaginação é mais importante do que  
o conhecimento"*

Albert Einstein

---

Neste capítulo estuda-se o projeto das redes de comunicação para o oferecimento de serviços de "Distributed Home Theatre" ou DHT. O compromisso entre a economia no custo de largura de banda e o custo de replicação de repositórios de filmes é analisado em quatro tipos diferentes de rede: i) redes *sem* compartilhamento de fluxo (RSCF), ii) redes *com* compartilhamento de fluxo (RCCF), iii) redes com servidores distribuídos (RCSD) e iv) redes com servidores distribuídos e compartilhamento de fluxo (RSDCF). Estas redes são estudadas em cenários de replicação de servidores de filmes, uso de *caching* de um ou mais níveis e redes mistas com serviços de VOD e DHT. Este capítulo está organizado da seguinte forma: A seção 2.1 introduz os serviços de DHT e os modelos adotados neste trabalho. Na seção 2.2 estuda-se os custos do oferecimento de serviços DHT em redes *sem* compartilhamento de fluxo (RSCF) e um princípio de minimização do custo de banda passante é mencionado. A seção 2.3 estuda estes custos em redes *com* compartilhamento de fluxo (RCCF), a seção 2.4 aborda as redes com servidores distribuídos (RCSD) e finalmente a seção 2.5 estuda o custo do oferecimento de serviços DHT em redes com servidores distribuídos e compartilhamento de fluxo (RSDCF).

## 2.1 Serviços de DHT

A idéia básica do “*Distributed Home Theatre*” ou DHT é permitir que um grupo distribuído de usuários possa debater sobre o conteúdo de um filme. O DHT pode ser visto com uma teleconferência na qual os participantes estão assistindo um mesmo filme. Qualquer participante de uma sessão de DHT pode executar operações de VCR e iniciar um debate sobre uma cena específica. Esta operação é executada instantaneamente e seus resultados são vistos por todos os outros participantes da sessão.

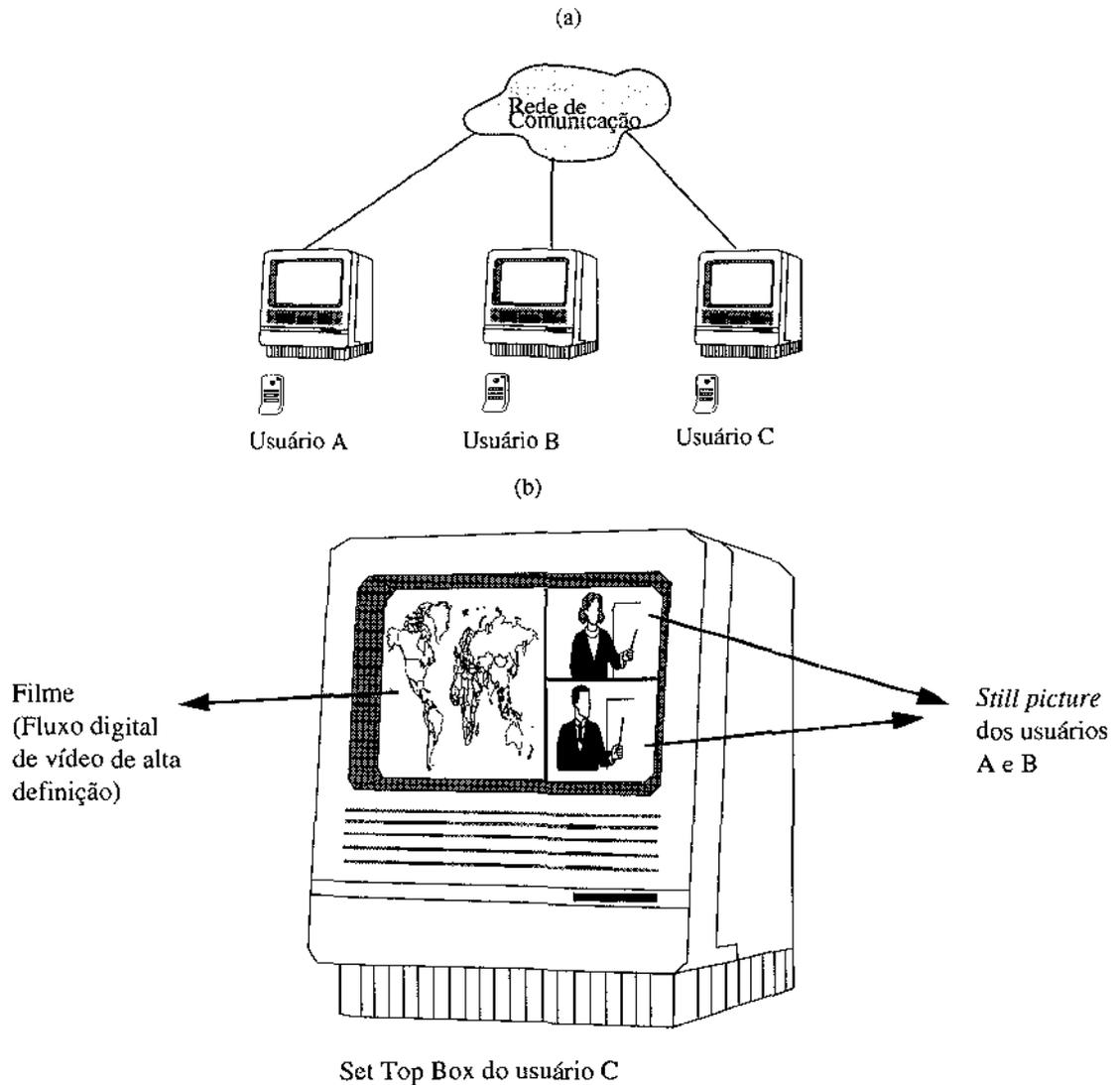


Figura 2.1: Exemplo de uma sessão DHT (Figura 2.1.a) e detalhe do STB do usuário C durante a sessão de DHT (Figura 2.1.b).

A Figura 2.1 exemplifica uma sessão de DHT. Na Figura 2.1.a tem-se uma sessão de DHT com três usuários. Nos STBs de cada usuário pode-se indentificar dois tipos de fluxo de vídeo: i) um fluxo de vídeo de alta definição que é o filme compartilhado pelos usuários e ii) um fluxo de vídeo de baixa definição (*still*

*picutre*) que, em cada STB, mostra a imagem de todos os participantes remotos da sessão de DHT. Esta divisão é mostrada na Figura 2.1.b. O filme é exibido de forma sincronizada para todos os usuários da sessão, i.e., todos os usuários da sessão enxergam a mesma porção do filme. Cada vez que um usuário executa uma operação de VCR esta é transmitida ao servidor de vídeo via canais de controle e este se encarrega da sincronização da imagem nos STBs de todos os usuários da sessão. Cada STB é equipado com uma câmera de vídeo, com uma saída de áudio e com um microfone, permitindo assim interação entre os usuários da sessão.

### 2.1.1 Modelo da Rede de Comunicação

O modelo da árvore de distribuição adotado neste trabalho é mostrado na Figura 2.2. Assume-se que a rede de distribuição é uma árvore  $d$ -ária balanceada. Cada nó da árvore representa um comutador e as folhas representam os *head ends* que conectam os usuários à rede. Cada comutador pode ter um servidor conectado a ele. O número de *head ends*  $H$  é determinado pelo número de usuários, dado um número máximo de usuários por *head end*. O número de níveis da hierarquia é dado por:

$$L(d) = \log_d(H)$$

e o número de comutadores  $W(d)$  nesta rede é dado por:

$$W(d) = \sum_{n=1}^{L(d)} d^n$$

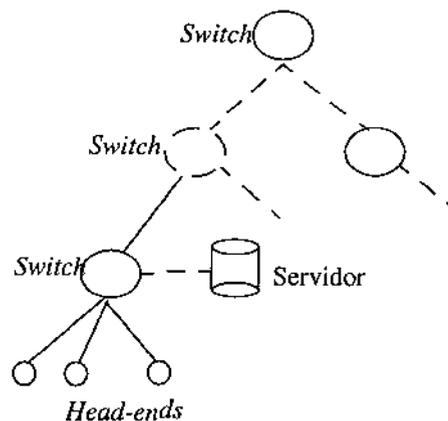


Figura 2.2: Modelo da Rede

Nesta dissertação assume-se, sem perda de generalidade, uma árvore binária balanceada com 1024 *head ends* e 100 usuários por *head end*. Entretanto, esta formulação pode ser facilmente generalizada para árvores  $d$ -árias não balanceadas.

### 2.1.2 Distribuição dos Usuários

O custo de largura de banda de uma sessão de DHT é determinado pelo número de canais alocados para a sessão. Desta forma, a distribuição geográfica dos usuários de uma sessão de DHT tem um grande impacto no custo da banda passante. Entretanto, esta distribuição só será realmente conhecida quando o sistema estiver em operação. Assim sendo, os resultados deste trabalho foram gerados considerando-se três distribuições diferentes: i) uma distribuição uniforme, ii) uma distribuição normal, e iii) uma distribuição normal por *head end* para representar, respectivamente, padrões de concentração baixo, médio e alto de usuários por sessão de DHT. A média da distribuição normal é igual à moda do número de *head ends* e cada distribuição normal por *head end* é centrada no *head end* em questão. Por exemplo, quando considerarmos uma distribuição normal por *head end* com média 525 e com desvio padrão 5, 68.26% dos participantes de uma sessão de DHT estão estatisticamente localizados entre os *head ends* 520 e 530.

### 2.1.3 Metodologia de Investigação

A investigação do compromisso entre o custo de largura de banda e o custo de replicação de servidores de filmes é essencial no projeto de redes que ofereçam serviços de vídeo. Se o custo de largura de banda fosse insignificante, teria-se um servidor central (ou servidores) fornecendo exibição de filmes para toda a comunidade da rede. Se ao contrário, o custo de servidor fosse zero, teria-se um repositório de vídeo nos “*set top box*” de cada usuário. Obviamente, nenhuma destas abordagens é realista. Os recursos atuais da rede estão longe de fornecer a demanda de largura de banda gerada pela solução de um servidor central e os servidores de vídeo são mais complexos e mais caros do que os atuais computadores pessoais. Assim sendo, uma solução para aliviar os requisitos de largura de banda consiste na replicação de servidores em alguns nós da árvore de distribuição. Em um projeto real da rede, o número e a localização dos servidores são determinados pela demanda regional, pela topologia da rede e pelo custo atual da tecnologia.

Na tentativa de entender o compromisso entre a redução de largura de banda e a replicação de programas este trabalho analisa estratégias de replicação. Através da replicação de servidor os requisitos de largura de banda de cada servidor diminui e, conseqüentemente, o custo individual dos servidores também. A fim de se investigar qual deve ser o nível ótimo para a replicação de servidores inicialmente considera-se o custo de um único servidor localizado na raiz da árvore de distribuição (nível 0). Numa segunda etapa, servidores são colocados somente nos nós do nível 1. Procede-se dessa forma considerando-se redes com servidores localizados somente nos nós do *i*-ésimo nível.

Os resultados nesta dissertação foram obtidos através de simulação. O método de replicação foi utilizado para gerar intervalos de confiança com 95% de nível de confiança. O número de replicações para calcular cada ponto das curvas foi tal que a largura dos intervalos de confiança é menor do que 5% da média. Dado que os

resultados gerados tiveram um alto grau de confiança, apenas os valores médios são mostrados para facilitar a interpretação visual dos gráficos.

Para permitir a comparação de tendências, tanto o custo de largura de banda quanto o de armazenamento foram normalizados pelo maior valor de cada curva. Os resultados também são apresentados pela profundidade normalizada (nível 0 corresponde ao nível da raiz e o nível 1 corresponde ao nível dos *head ends*). Nos exemplos numéricos é mostrado o impacto do número de usuários por sessão e o impacto da distribuição dos usuários por sessão no custo total da rede. No modelo adotado, o custo dos sinais de controle bem como dos sinais de áudio e dos sinais de vídeo de baixa definição não são levados em consideração, dado que os sinais de vídeo de alta definição são os maiores consumidores de largura de banda.

As seções seguintes analisam o compromisso entre o custo de largura de banda e o custo de replicação de servidores de vídeo nos quatro tipos de rede considerados nesta dissertação: Redes sem compartilhamento de fluxo, Redes com compartilhamento de fluxo, Redes com servidores distribuídos e Redes com servidores distribuídos e compartilhamento de fluxo.

## *2.2 Redes de Comunicação sem Compartilhamento de Fluxo (RSCF)*

Nesta seção estuda-se o fornecimento de serviços de DHT em redes que não oferecem o compartilhamento de fluxo (RSCF) de vídeo entre os usuários de uma sessão. Para cada usuário da sessão existe um fluxo individual de vídeo e todos os fluxos de uma sessão de DHT são distribuídos por um mesmo servidor, chamado de servidor de controle. Um exemplo desta estratégia é mostrado na Figura 2.3.

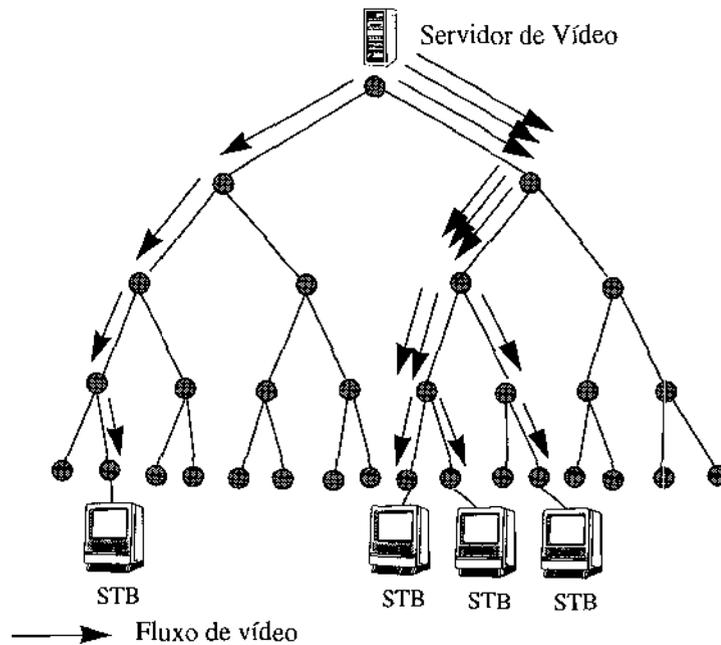


Figura 2.3: Exemplo de uma rede com fluxo individual de vídeo (RSCF) para cada usuário da sessão de DHT.

### 2.2.1 Custo de Largura de Banda

O custo total de largura de banda ( $C_b$ ) é a soma do custo de cada canal alocado. O custo de um canal alocado é proporcional ao número de programas que passam através dele. Assim,

$$C_b = \gamma_b \sum_{\Lambda} b(\lambda_i)$$

em que:

$\Lambda$  - é o conjunto de canais

$b(\lambda_i)$  - é a largura de banda do canal

$\gamma_b$ - é uma constante de normalização

$C_b$  é normalizado pelo fator  $\gamma_b$ , o que torna mais fácil a exploração de cenários com custos diferentes.

Para minimizar o custo total de banda passante é necessário minimizar o custo individual de cada sessão de DHT. O teorema abaixo estabelece condições para esta otimização.

**Teorema:** O custo mínimo de largura de banda de uma sessão de DHT, em uma rede onde o custo de largura de banda/capacidade dos canais obedece uma relação linear, é obtido quando o servidor de controle está

localizado em um nó com cinquenta por cento ou mais dos participantes da sessão abaixo dele e cujos descendentes têm cada um deles menos do que cinquenta por cento dos participantes abaixo de si.

Este teorema pode ser usado nas políticas de controle de admissão para determinar qual dentre os servidores da rede deve ser o servidor de controle de uma sessão de DHT. Este teorema foi originalmente provado em [29]. Uma cópia desta prova encontra-se no Apêndice para conveniência do leitor.

### 2.2.2 Custo de Armazenamento

O custo de um servidor depende do número de filmes armazenados e da taxa de acesso a esses filmes. A taxa de acesso a um programa está relacionada à largura de banda necessária para suportar os pedidos por este programa. Por exemplo, um servidor com os dez filmes mais populares (taxa de acesso alta) pode ter uma demanda maior de largura de banda (e conseqüentemente maior custo) do que um servidor grande com filmes pouco populares.

Para capturar os dois fatores do custo de armazenamento utilizou-se a lei de Zipf [40]. Foi demonstrado experimentalmente que a lei de Zipf modela a popularidade da locação de filmes nos Estados Unidos, utilizando-se dados publicados em revistas especializadas tais como a *Billbord Magazine* e a *Video Store Magazine* [32]. Para obtenção dos resultados assumiu-se que a popularidade dos programas nos serviços de DHT é a mesma que a probabilidade encontrada na locação em lojas de aluguel de filmes. De acordo com a lei de Zipf, a probabilidade  $Z(i)$  do programa  $i$  ser escolhido dentre  $N_p$  programas armazenados é dada por:

$$z(i) = C/i$$

$$C = 1 / \left( \sum_{i=1}^{N_p} 1/i \right)$$

Define-se o custo do servidor localizado na raiz da árvore de distribuição como sendo unitário. Assim, o custo de armazenamento na raiz é:

$$C_{raiz} = \sum_{i=1}^{N_p} z(i)$$

em que  $z(i)$  é a probabilidade do programa  $i$  ser escolhido dentre todos os programas, ordenados de forma decrescente por suas popularidades.

A influência da popularidade pode ser vista pelo fato de que, se a população com acesso a um certo servidor for reduzida pela metade, o custo do servidor é dado por:

$$C_s = \sum_{i=1}^{N_p} z(2 \times i)$$

em que  $z(2xi)$  reflete a diminuição dos requisitos do programa  $i$  devido a taxa de acesso menor e  $z(j) = z(N_p)$ , para  $j > N_p$ .

Finalmente, o custo total de armazenamento é dado pela soma individual dos custos de cada servidor é

$$C_s = \sum_{\Delta} C_i$$

no qual  $\Delta$  é o conjunto de todos os servidores da rede.

### 2.2.3 Custo Total

O custo total do fornecimento de serviços de DHT é dado pela soma dos custos de largura de banda e dos custos de armazenamento.

$$C_t = C_b + C_s$$

Dado que os custos de largura de banda e de armazenamento são normalizados, pode-se definir um fator de peso,  $\rho$ , para refletir a proporção entre custo de largura de banda e custo de armazenamento. Neste caso, o custo total da rede pode ser dado por:

$$C_t(\rho) = (2/(1 + \rho)) \times (\rho \times C_b + C_s) \quad \text{para } \rho > 0$$

### 2.2.4 Replicação de Servidor

A estratégia de replicação funciona da seguinte forma: inicialmente considera-se o custo de um único servidor localizado na raiz da árvore de distribuição (nível 0). Numa segunda etapa, coloca-se servidores somente nos nós do nível 1. Procede-se dessa forma considerando-se redes com servidores localizados somente nos nós do  $i$ -ésimo nível.

No cálculo do custo de replicação de servidor no  $i$ -ésimo nível da árvore de distribuição um servidor é escolhido para ser o servidor de controle de uma sessão de DHT se este possuir o maior número de usuários da

sessão abaixo de si. Obviamente, para uma certa sessão e um nível específico da árvore, este critério produz os mesmos custos obtidos quando se usa o teorema enunciado em 2.2.1.

O custo total de largura de banda considerando replicação no  $l$ -ésimo nível é dado por:

$$C_b(l) = \gamma_b \sum_{\beta} C_i(l)$$

em que:

$C_i(l)$  - é o custo de largura de banda da  $i$ -ésima sessão de DHT quando a replicação de servidor é feita no nível  $l$ . Este custo é a soma dos canais alocados para a sessão.

$\beta$  - é o conjunto de todas as sessões DHT.

$\gamma_b$  - é a constante de normalização.

Como  $C_b$  é normalizado por  $\gamma_b$ , o custo de largura de banda pode ser escolhido arbitrariamente, i.e., pode ser substituído por valores reais uma vez que estes estejam disponíveis.

Na Figura 2.4 o custo normalizado de largura de banda como uma função da profundidade normalizada é mostrado para distribuições diferentes. Nota-se que, à medida que os participantes tornam-se mais concentrados, a localização ótima para a colocação do servidor tende a mover-se para perto do nível dos *head ends*. Para usuários altamente dispersos (distribuição uniforme - Figura 2.4.a) o nível ótimo é um nível abaixo da raiz. Para participantes moderadamente concentrados (distribuição normal - Figura 2.4.b), o nível ótimo fica aproximadamente a um terço da altura da árvore e para usuários altamente concentrados (distribuição normal por *head end* - Figura 2.4.c) o nível ótimo é dois níveis acima do nível dos *head ends*. A Figura 2.4 ilustra o princípio de minimização que diz que o nível ótimo para o servidor de controle de uma sessão de DHT deve conter cinquenta por cento ou mais dos participantes abaixo de si e nenhum de seus descendentes pode satisfazer esta condição. Nota-se que, à medida que os usuários tornam-se mais dispersos, o princípio de minimização é atingido em nós mais próximos da raiz.

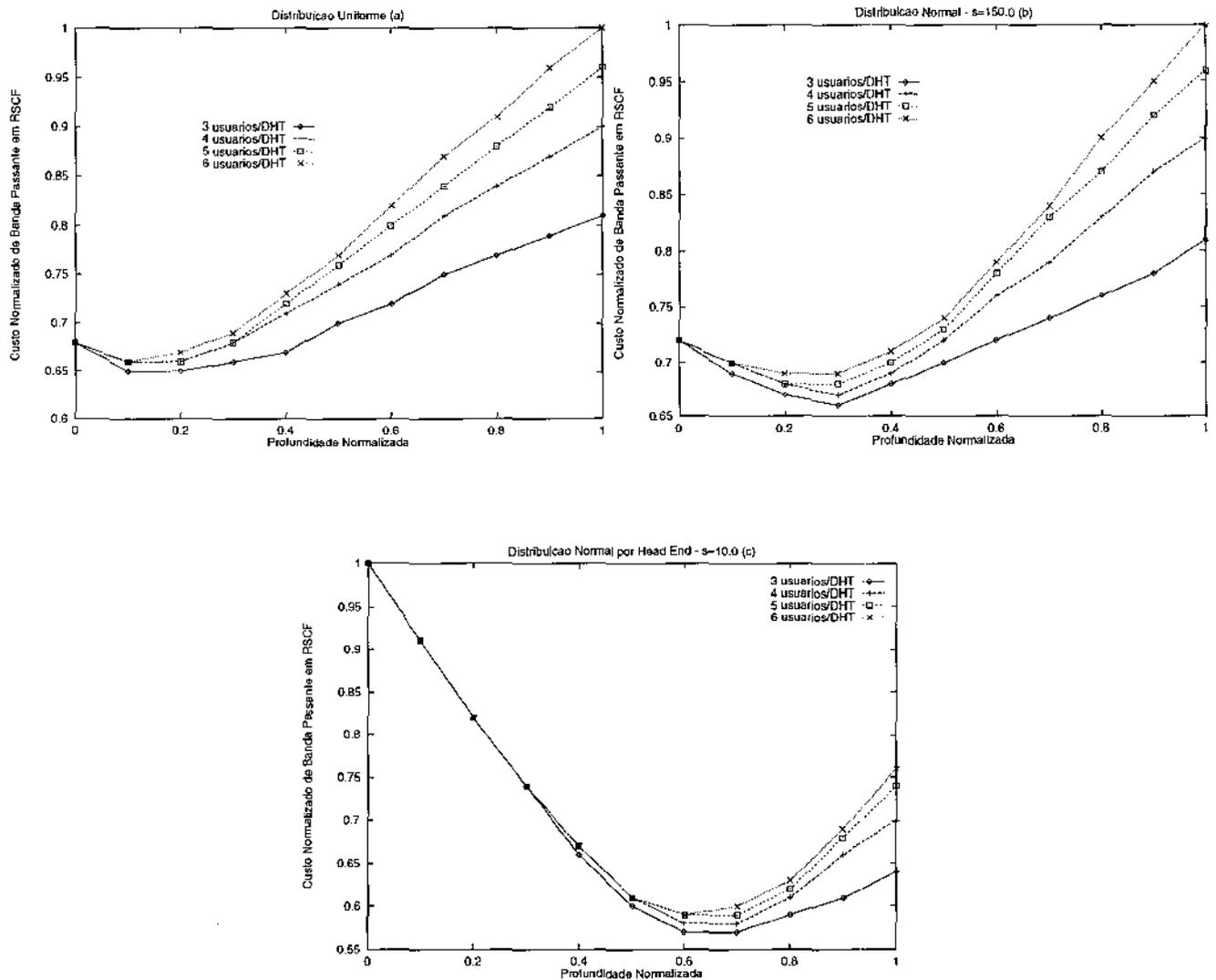


Figura 2.4: Custo normalizado de banda passante em RSCF x profundidade normalizada para: i) diferentes números de usuários por sessão DHT, ii) distribuição uniforme (Figura 2.4.a), iii) distribuição normal com  $\sigma=150.0$  (Figura 2.4.b) e iv) distribuição normal por *head end* com  $\sigma=10.0$  (Figura 2.4.c)

É interessante observar que o número de usuários por sessão de DHT tem um impacto menor do que a distribuição destes usuários. Na verdade, o número de usuários por sessão tem influência na escolha do servidor de controle apenas para distribuições moderadamente concentradas. Se o número de participantes cresce, neste tipo de distribuição, a localização ótima do servidor de controle move-se em direção da raiz. A Figura 2.4.b mostra que, para um número pequeno (3 ou 4 usuários) de participantes de uma sessão de DHT, a posição ótima do servidor é cerca de 0.3 da profundidade da árvore. Enquanto que, para um número maior (5 ou 6), o nível ótimo é o nível 0.2. Tal efeito não foi observado para distribuições pouco (Figura 2.4.a) e altamente concentradas (Figura 2.4.c).

O custo de replicação de servidor no  $l$ -ésimo nível é dado por:

$$C_s(l) = \gamma_s(l) \sum_{j=1}^{d^l} \sum_{i=1}^{N_p} z(i/x_j)$$

em que:

$x_j$  - é a demanda do  $j$ -ésimo servidor, i.e., a taxa entre o número de sessões de DHT servidas por este servidor e o número total de sessões de DHT.

$\gamma_s(l)$  - é a constante de normalização para o nível  $l$ .

O custo total normalizado para replicação de servidor no nível  $l$  é dado por  $C_b(l) + C_s(l)$ , que é a soma dos custos normalizados de largura de banda e de replicação de servidor. A Figura 2.5 ilustra esta computação.

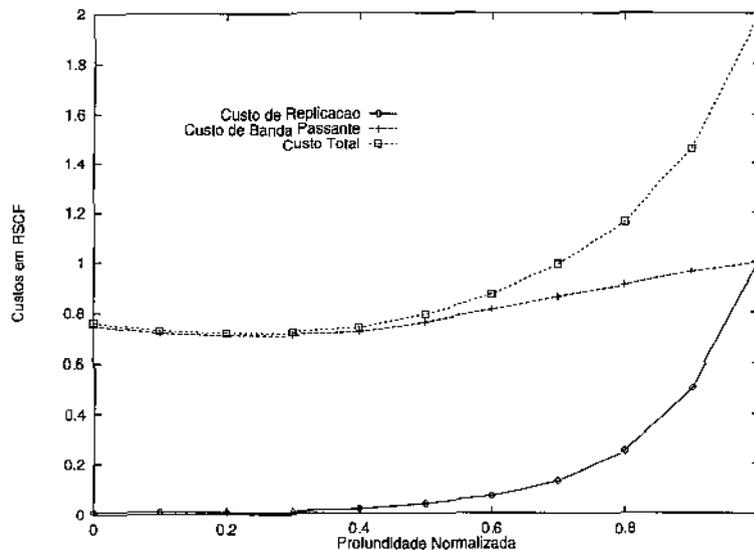


Figura 2.5: Um exemplo da computação do custo total, em RSCF, considerando replicação de servidores para uma distribuição normal com  $\sigma=150$  e 5 usuários por sessão DHT

A Figura 2.6 mostra o custo total normalizado da rede como uma função da profundidade normalizada. Foi observado que, para concentrações fracas de participantes (Figura 2.6.a e Figura 2.6.b), a curva normalizada do custo é praticamente plana até o nível 0.3. Isto acontece porque a variação do custo de largura de banda e do custo de armazenamento é pequena nestes níveis. À medida que a profundidade do nível de replicação aumenta, o custo total aumenta devido ao crescimento do custo de largura de banda e de armazenamento. Para a

distribuição moderadamente concentrada e um número pequeno de participantes por sessão (3 ou 4 usuários) nota-se que a redução do custo de largura de banda contrapõe-se ao custo do servidor com um mínimo no nível 0.3. Para distribuições altamente concentradas, à medida que a concentração aumenta, o ganho no custo de largura de banda domina o custo total, empurrando o nível ótimo para perto do nível dos *head ends*.

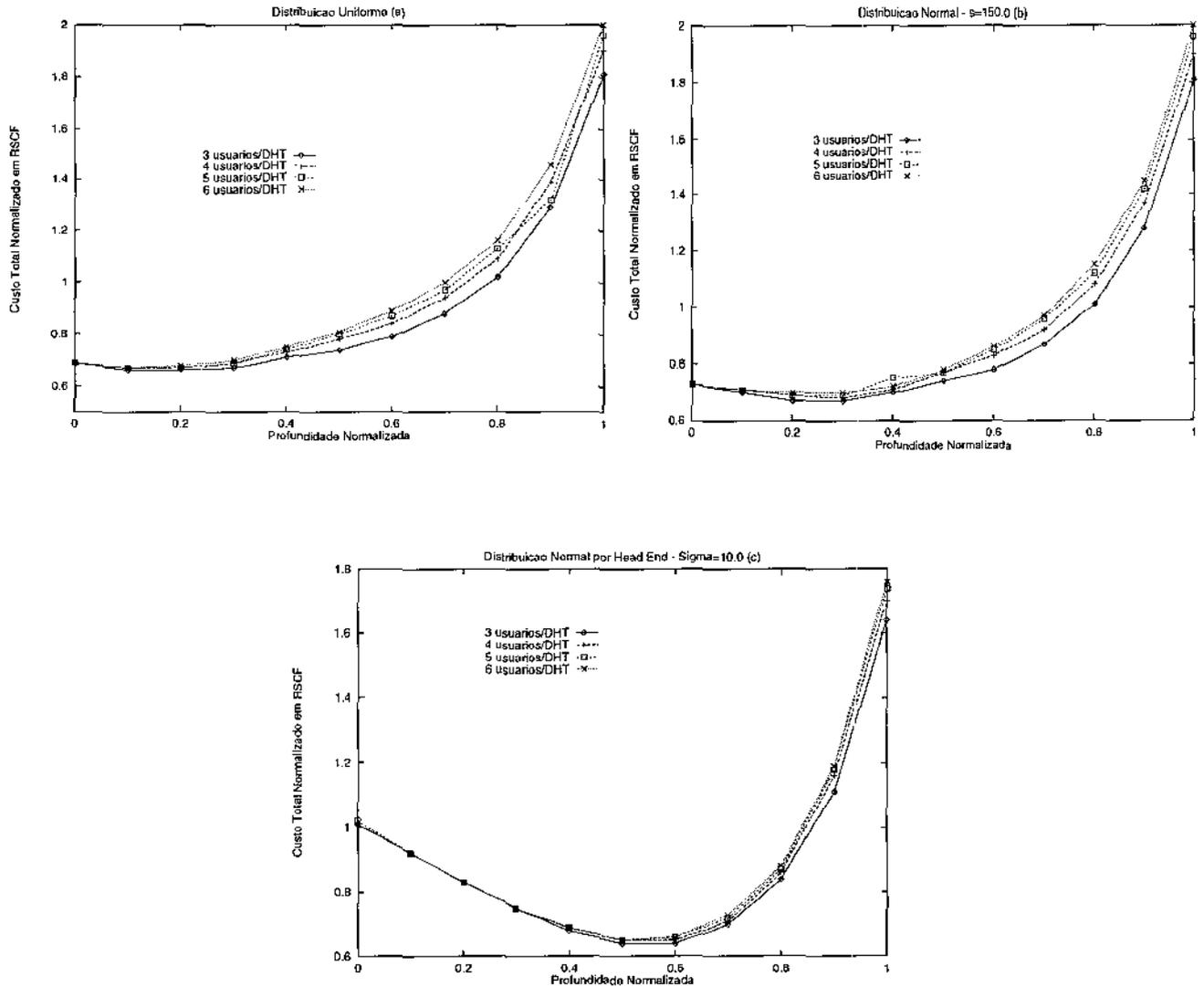


Figura 2.6: Custo total normalizado em RSCF x profundidade normalizada para i) números diferentes de usuários por sessão DHT, ii) distribuição uniforme (Figura 2.6.a), iii) distribuição normal com  $\sigma=150$  (Figura 2.6.b) e iv) distribuição normal por *head end* com  $\sigma=10.0$  (Figura 2.6.c)

Todos os resultados apresentados até aqui consideram que os custos de largura de banda e de armazenamento têm o mesmo peso. A Figura 2.7 mostra o impacto da atribuição de pesos diferentes ao custo de largura de banda e ao custo de armazenamento (variação de  $\rho$ ). Nota-se que, à medida que a importância do custo de largura de banda diminui, o custo total também diminui. Desta forma, a localização ótima do servidor

de controle move-se para perto da raiz. Este fato é mais evidente para distribuições fracamente concentradas de usuários (Figura 2.7.a) do que para distribuições altamente concentradas (Figura 2.7.b), devido à necessidade de conexão de usuários dispersos. Para a distribuição da Figura 2.7.a o nível ótimo de localização de servidor, mesmo quando o custo de banda passante tem o mesmo peso do custo de replicação, é nos níveis próximos a raiz. Quanto o peso do custo de banda passante começa a diminuir esta característica acentua-se. Já para a distribuição da Figura 2.7.b ainda é interessante manter a replicação de servidores em torno no nível normalizado 0.5.

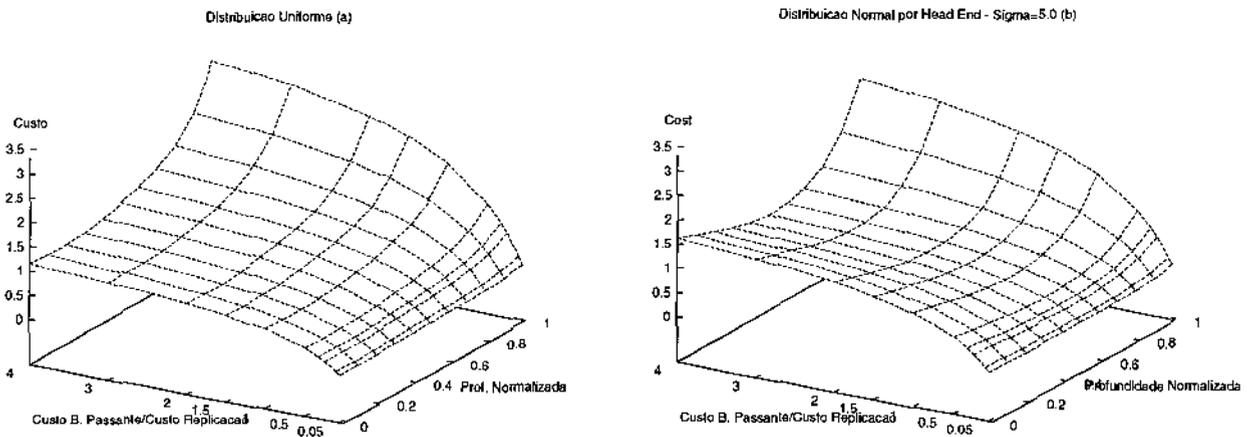


Figura 2.7: Custo total em RSCF x profundidade normalizada x  $\rho$  para i) 5 usuários por sessão, ii) distribuição uniforme (Figura 2.7.a) e iii) distribuição normal por *head end* com  $\sigma=5.0$  (Figura 2.7.b)

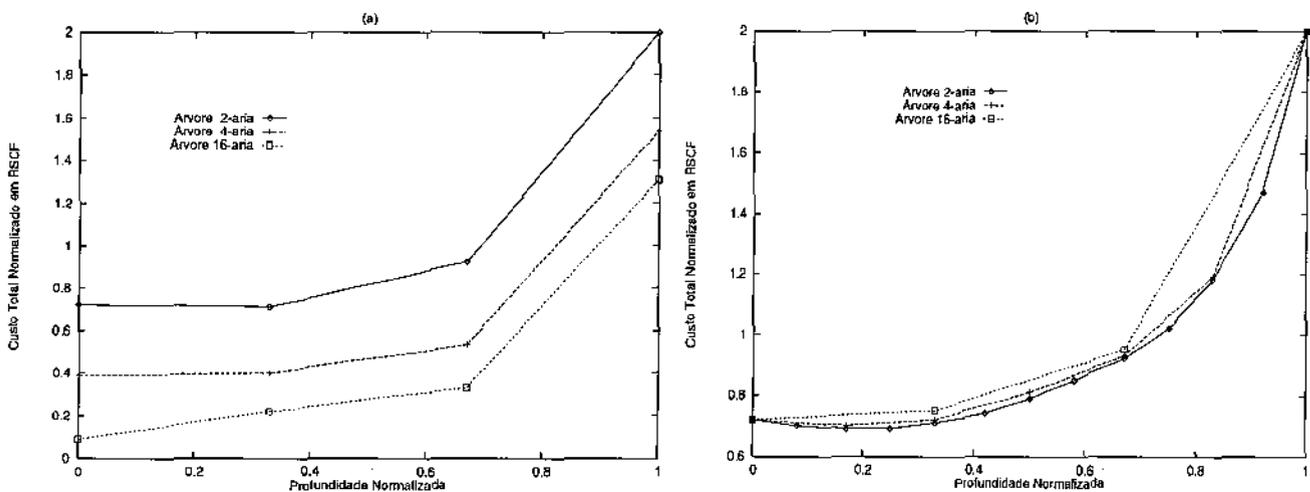


Figura 2.8: Custo total normalizado em RSCF x profundidade normalizada para topologias diferentes

Para avaliar a dependência dos resultados com relação à topologia da rede, analisou-se árvores  $n$ -árias balanceadas para diferentes valores de  $n$ . A Figura 2.8 mostra um exemplo com 4096 *head ends* considerando árvores balanceadas binárias, 4-árias e 16-árias. Na Figura 2.8.a as curvas estão normalizadas por um único valor comum, permitindo a comparação entre seus valores absolutos. Já na Figura 2.8.b cada curva encontra-se normalizada por seu próprio valor máximo, permitindo a comparação de seus formatos. Percebe-se claramente, na Figura 2.8.a, que à medida que a conectividade de nós aumenta, o custo total diminui devido à redução dos requisitos de largura de banda. A rede 4-ária chega a obter uma redução de 45% no custo total, se comparada a rede 2-ária. Para a rede 16-ária esta redução chega a 85%, também se comparada a rede 2-ária.. Pela Figura 2.8.b nota-se que a topologia não tem um impacto significativo no nível ótimo para a replicação. Todas as três curvas têm formato similar e comportamento semelhante na mesma profundidade normalizada.

### 2.2.5 Caching de Programas

Nesta seção investiga-se a estratégia de *caching* de programas. Ao invés de replicar um servidor por inteiro replica-se somente os programas mais populares. Desta forma, tenta-se reduzir o custo total através da redução dos custos individuais dos servidores. Entretanto, é necessário manter um servidor completo na raiz da árvore para lidar com pedidos de programas pouco populares (*cache miss*).

Para avaliar o impacto da adoção de *caching* de programas foi usado o mesmo raciocínio da replicação de servidor: considera-se a existência de *caches* somente nos nós do nível  $l$ , mais um servidor completo na raiz da árvore. Para cada sessão de DHT é designado um *cache* de controle no nível  $l$ , i.e., um cache que irá lidar com os pedidos daquela sessão.

O custo de largura de banda para a replicação de cache no nível  $l$  é dado por:

$$C_b = \gamma_b \left( \alpha \sum_{\beta} c_b(l) + ((1 - \alpha) \times \mu \times h) \right)$$

em que:

$\beta$  - é o conjunto das sessões de DHT.

$\gamma_b$  - é a constante de normalização

$C_b(l)$  - é o custo de largura de banda quando consideramos a replicação de *cache* no  $l$ -ésimo nível.

$\mu$  - é o número total de participantes

$h$  - altura da árvore

A probabilidade de ocorrer um *cache hit* é dada por:

$$\alpha = \sum_{i=1}^M z(i)$$

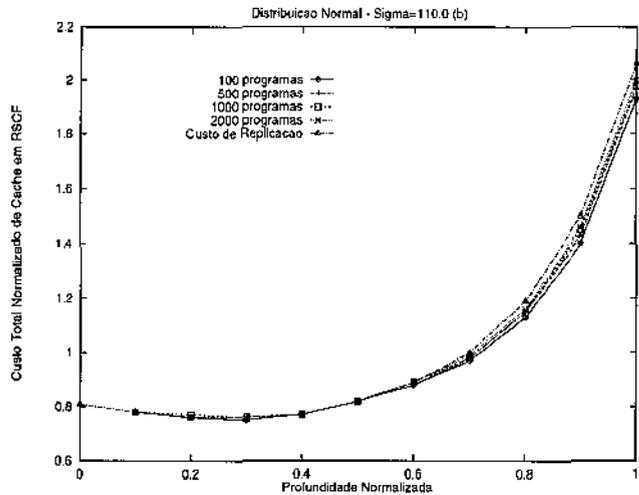
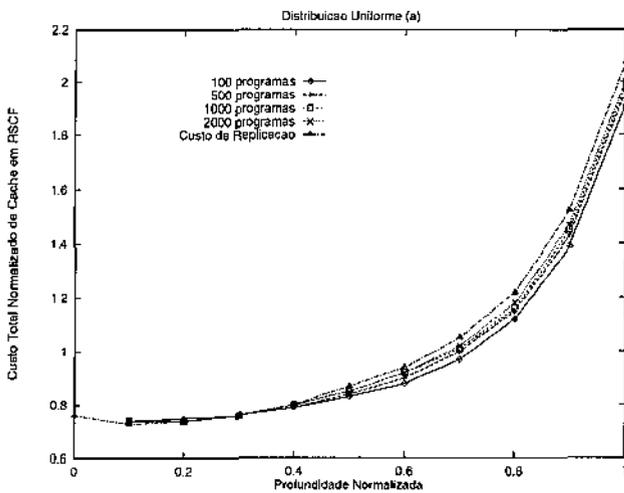
e o custo do *cache* para a replicação de *cache* no nível  $l$  é dado por:

$$C_c(l) = \gamma_c(l) \sum_{j=1}^{d^l} z(1/x_j) + C_{root}$$

em que:

$\gamma_c(l)$  - é a constante de normalização

$x_j$  - é a demanda do  $j$ -ésimo *cache*, i.e., a taxa entre o número de sessões de DHT servidas pelo  $j$ -ésimo *cache* e o número total de sessões.



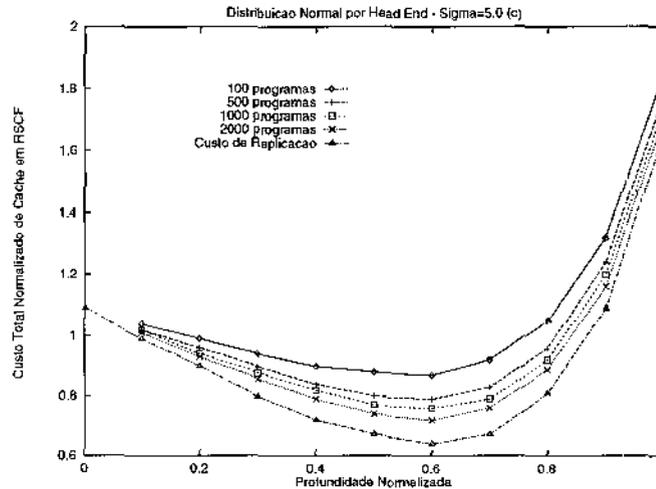


Figura 2.9: Custo normalizado de *cache* em RSCF x profundidade normalizada para : i) tamanhos diferentes de *cache*, ii) 5 usuários por sessão de DHT, iii) distribuição uniforme (Figura 2.9.a), iv) distribuição normal com  $\sigma=110.0$  (Figura 2.9.b) e v) distribuição normal por *head end* com  $\sigma=5.0$  (Figura 2.9.c)

A Figura 2.9 mostra, para vários tamanhos de *cache*, o custo normalizado do *cache* como função da profundidade normalizada. Esta figura mostra também o custo da replicação de servidor, i.e., considera-se servidores completos somente nos nós do nível  $l$ . Nota-se a mesma tendência observada na análise de replicação de servidor. Para concentrações fraca e moderada, a curva de custo é praticamente plana até o nível 0.3 e nesta região da árvore de distribuição todos os *caches* apresentam o mesmo custo. No nível dos *head ends* os *caches* pequenos são mais atrativos e podem garantir um ganho no custo de aproximadamente 10% no custo de armazenamento. Poderia-se esperar que, no nível dos *head ends*, os *caches* maiores fossem mais atrativos pois evitariam os *cache misses*, entretanto, para concentrações de usuários fracas e moderadas, o preço pago para um *cache miss* não é uma penalidade. Na realidade, um *cache miss* gera economia de largura de banda, pois o nível que minimiza a demanda de largura de banda é perto da raiz. Desta forma, no projeto de redes reais, se outros serviços de vídeo requererem a colocação dos *caches* perto dos *head ends*, é melhor (para os serviços de DHT) a adoção de *caches* pequenos. Para usuários altamente concentrados, o cenário é diferente. Neste caso, um *cache miss* é uma penalidade real porque o nível ótimo de localização do *cache* é perto dos *head ends*. Conseqüentemente, deve-se tentar satisfazer o maior número possível de pedidos neste nível. Esta tendência pode ser observada pela economia no custo à medida que o tamanho do *cache* aumenta, e pelo fato de que a replicação de servidor é sempre a opção mais econômica. Assim sendo, se por qualquer razão de projeto for necessário adotar a estratégia de *caching* de programas, os *caches* maiores implicam na solução de menor custo. Padrão semelhante para a replicação de servidor e replicação de *cache* podem ser explicados pela alta quantidade de largura de banda necessária para o fornecimento dos serviços de DHT.

Um compromisso entre a replicação de servidor e a replicação de *cache* é o uso de *caches* multi-nível [21]. No sistema de *cache* multi-nível, *caches* são colocados em níveis diferentes da árvore e seus conteúdos são “contíguos”. Assim, se ocorrer um *cache miss* em um determinado nível, o pedido pode ser satisfeito em um nível mais alto e não necessariamente no nível da raiz, como no caso do *cache* de um único nível. Os custos de largura de banda e de armazenamento para *caches* multi-nível são uma generalização do caso do *cache* de um único nível. Por exemplo, o custo para um *cache* com dois níveis localizados nos níveis  $l_1$  e  $l_2$  da árvore de distribuição é dado por:

$$C_b(l_1, l_2) = \gamma_b \left( \alpha_1 \sum_{\beta} c_b(l_1) + \alpha_2 \sum_{\beta} c_b(l_2) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \times u \times h \right)$$

$$C_c(l_1, l_2) = \gamma_c \left( \sum_{j=1}^{d^{l_1}} \sum_{i=1}^{M_1} z(1/x_j) + \sum_{k=1}^{d^{l_2}} \sum_{i=M_1+1}^{M_2} z(1/x_k) + C_{root} \right)$$

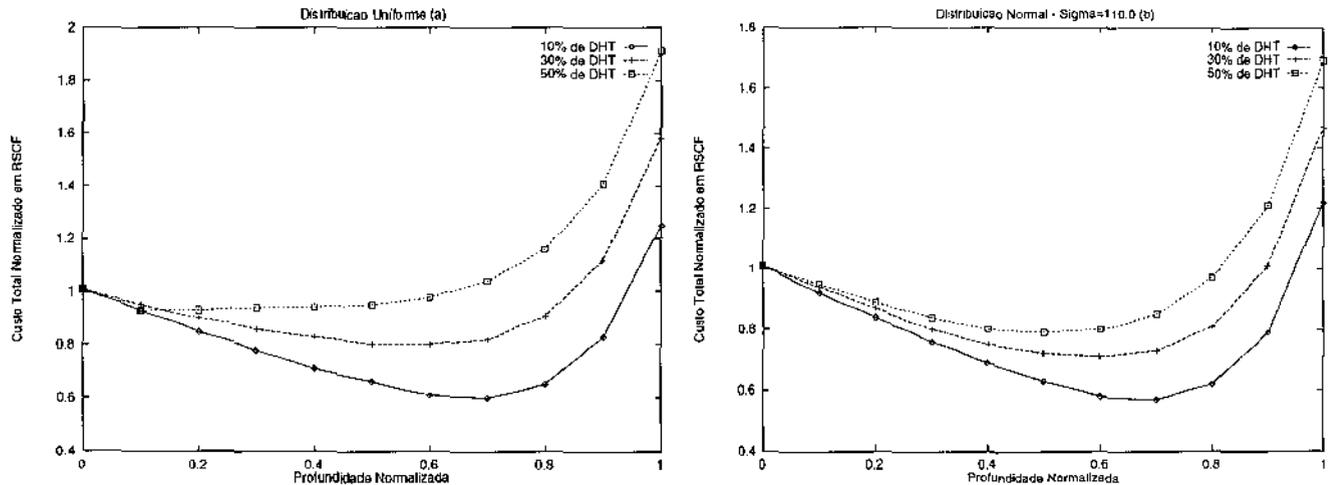
Os resultados obtidos demonstram que a adoção de *caches* multi-nível não é uma solução atrativa no projeto de RSCF para o fornecimento de serviços de DHT pelas mesmas razões apontadas no caso de *caches* de um único nível.

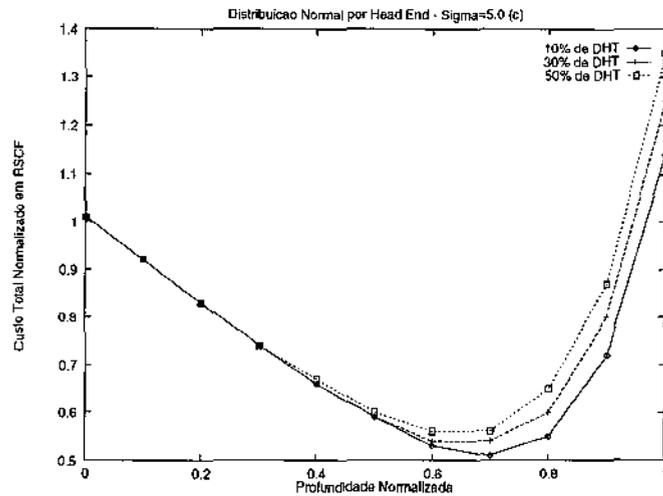
### 2.2.6 Redes com Serviços de DHT e VOD

As aplicações de vídeo serão os maiores consumidores de banda passante na futura rede de faixa larga. É essencial, no projeto das redes reais, que os requisitos de diferentes aplicações de vídeo sejam levados em consideração. Uma das aplicações mais promissoras de vídeo é a de Vídeo sob Demanda. Em um sistema de vídeo sob demanda os usuários individuais podem selecionar e assistir um determinado filme de um servidor de filmes. Fornecer serviços de DHT custa mais caro do que fornecer serviços de vídeo sob demanda. Isto acontece porque os usuários de um sistema de DHT se conectam ao servidor que minimiza o custo de banda passante da sessão de DHT, enquanto que os usuários de um sistema de vídeo sob demanda se conectam ao servidor mais próximo. Em outras palavras, para um mesmo número de usuários, o custo total de largura de banda de uma sessão de VOD é sempre o limite inferior do custo de banda passante de uma sessão de DHT.

A Figura 2.10 mostra o custo total de replicação de servidor em uma rede com serviços de DHT e VOD. Os servidores de vídeo fornecem programas para ambos os serviços. Nesta figura, varia-se a porcentagem do número total de usuários da população envolvidos em sessões de DHT de 30% a 50%. Acredita-se que a

porcentagem de usuários envolvidos em serviços de DHT será em torno de 30% e não excederá 50%. Sabe-se que a localização ótima de um servidor em uma rede com serviços de VOD está entre 70% e 90% de profundidade da árvore [22]. A Figura 2.10.a e a Figura 2.10.b mostram que, para concentrações de usuários fracas e moderadas, a tendência da localização ótima dos servidores de VOD é mantida somente para porcentagens pequenas (10%) de usuários de DHT. À medida que a porcentagem de usuários de DHT aumenta, o nível ótimo move-se para a raiz da árvore. Além disso, para a distribuição fraca de usuários, o ganho no custo total é baixo. Em outras palavras, os altos requisitos de largura de banda dos serviços de DHT dominam o custo da rede mesmo para porcentagens baixas de usuários de DHT, como por exemplo 30%. Para usuários altamente concentrados tem-se um cenário diferente (Figura 2.10.c). Comunidades de usuários altamente concentrados apresentam o mesmo padrão de usuários de um sistema de VOD. A localização ótima do servidor é mantida mesmo para porcentagens alta (50%) de usuários em sessões de DHT. Na verdade, a distribuição dos usuários de um sistema VOD pode ser considerada um caso extremo do padrão de distribuição de usuários de DHT na qual todos os participantes da sessão de DHT estão localizados em baixo de um mesmo *head end*.





**Figura 2.10:** Custo total normalizado em RSCF x profundidade normalizada considerando-se replicação de servidor em uma rede com serviços de VOD e DHT para: i) 5 usuários por sessão, ii) distribuição uniforme (Figura 2.10.a), iii) distribuição normal com  $\sigma=110.0$  (Figura 2.10.b) e iv) distribuição normal por *head end* com  $\sigma=5.0$  (Figura 2.10.c).

### 2.2.7 Principais Resultados para RSCF

A seção 2.2 explora o compromisso existente entre o consumo de largura de banda e a replicação de programas no fornecimento da aplicação de *Distributed Home Theatre* em redes sem compartilhamento de fluxo (RSCF). São analisadas estratégias de replicação de servidor e de replicação de cache que visam reduzir a alta demanda de largura de banda. Como o comportamento real dos usuários deve ser conhecido somente quando o serviço estiver disponível, três distribuições diferentes foram usadas para derivar os resultados. Adicionalmente, investigou-se também a influência do número de usuários por sessão e da topologia da rede. Para participantes que apresentam um padrão de concentração fraco/moderado o nível ótimo de localização do servidor é próximo a raiz da árvore de distribuição. Entretanto, para usuários que apresentam um padrão de concentração alto, o nível ótimo é perto dos *head ends*. Esta tendência pode ser explicada pelo alto custo que se tem quando o princípio de minimização não é satisfeito. Mostrou-se também como estes requisitos podem ter um impacto significativo no projeto de redes que ofereçam serviços de VOD e de DHT. Pode-se concluir que é fundamental a combinação das estratégias de replicação de programas com outras características da rede que levam a uma redução ainda maior do custo de banda passante. A seção 2.3 introduz os serviços de DHT oferecidos por redes *com* compartilhamento de fluxo.

### 2.3 Redes de Comunicação com Compartilhamento de Fluxo (RCCF)

Em redes com compartilhamento de fluxo (RCCF) um fluxo de vídeo é compartilhado pelos participantes de uma sessão DHT até o *switch* mais profundo em comum entre eles. A Figura 2.11 ilustra esta idéia. Nesta seção investiga-se o projeto de RCCF e os resultados obtidos são comparados com os resultados obtidos em RSCF.

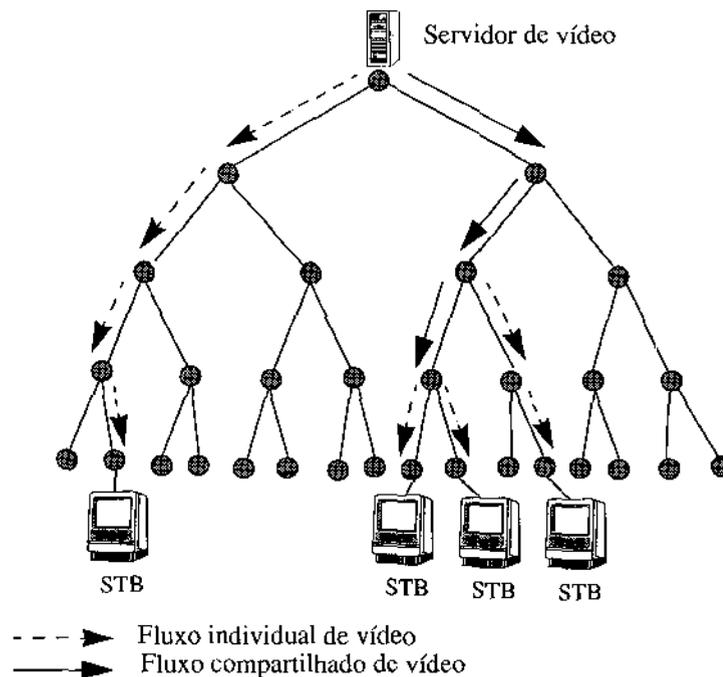


Figura 2.11: Exemplo de uma rede com compartilhamento de fluxo de vídeo (RCCF)

Nesta arquitetura é necessário um gerenciamento do fluxo de vídeo antes da conexão da sessão DHT ser estabelecida. Este gerenciamento visa determinar o grau de compartilhamento do fluxo. O processamento necessário para esta atividade deve ser considerado no projeto dos servidores e dos *switchs* da rede.

#### 2.3.1 Custos

Em RCCF o custo de largura de banda de uma sessão DHT é o mesmo para qualquer servidor localizado ao longo da subárvore de distribuição da sessão. Assim, quando toma-se em consideração o custo de replicação de servidores no  $l$ -ésimo nível pode-se escolher qualquer servidor daquele nível que pertença subárvore de distribuição da sessão.

O custo total de largura de banda considerando-se replicação no  $l$ -ésimo nível é dado por:

$$C_b(l) = \gamma_b \sum_{\beta} c_i(l)$$

em que:

$c_i(l)$  - é o custo da  $i$ -ésima sessão de DHT quando considera-se replicação de servidor no nível  $l$ .

$\beta$  - é o conjunto de sessões DHT.

$\gamma_b$  - é a constante de normalização.

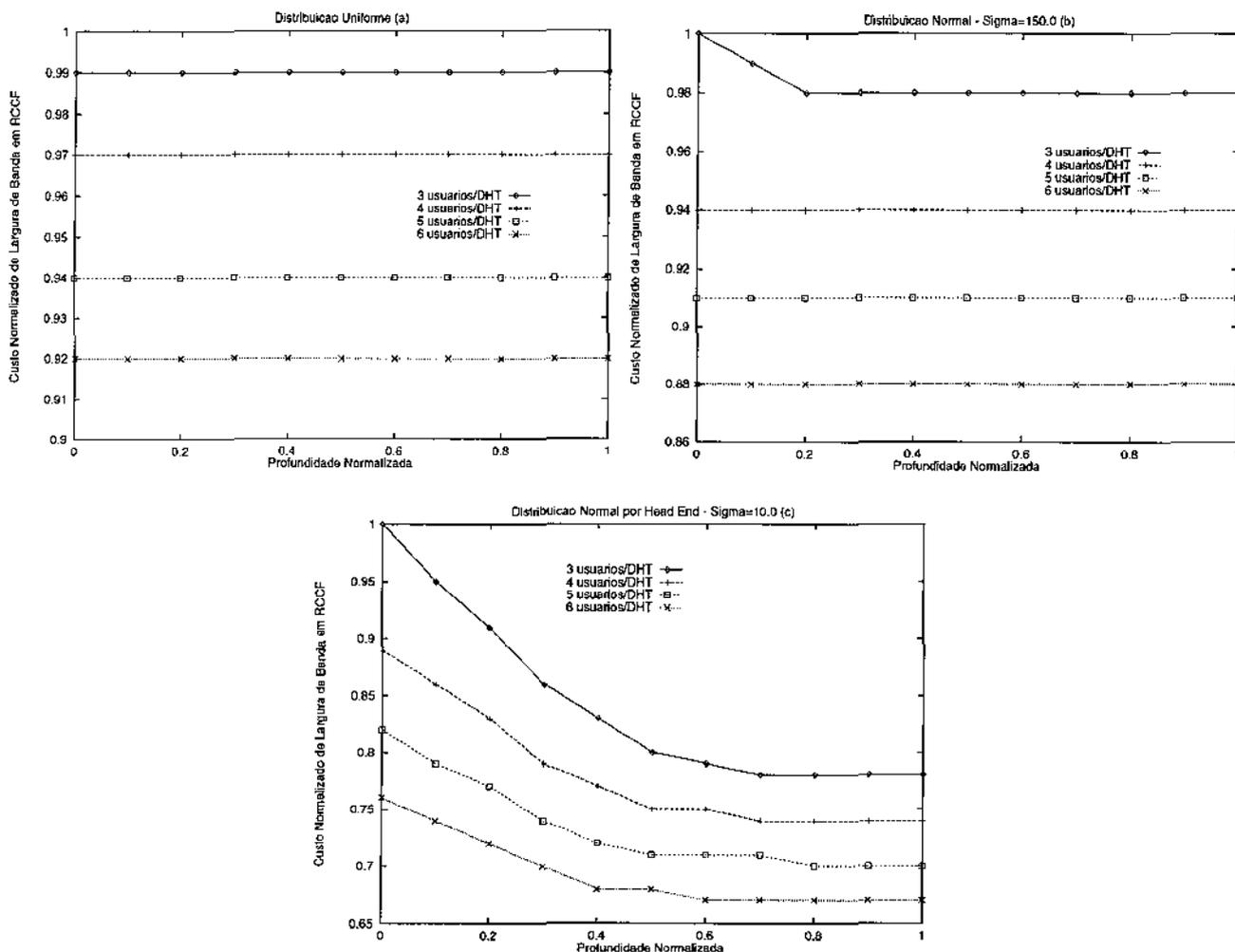


Figura 2.12: Custo normalizado de largura de banda em RCCF x profundidade normalizada para: i) número diferente de usuários por sessão, ii) distribuição uniforme (Figura 2.12.a), iii) distribuição normal geral com  $\sigma=150$  (Figura 2.12.b), e iv) distribuição normal por *head end* com  $\sigma=10$  (Figura 2.12.c).

Na Figura 2.12 é mostrado o custo normalizado de largura de banda como função da profundidade normalizada para distribuições diferentes de usuários. Para entender esta figura deve-se observar que o custo de

largura de banda de uma sessão DHT é o mesmo independentemente da localização do servidor de controle na subárvore de distribuição da sessão, i.e., se o servidor que fornece o fluxo de vídeo para uma sessão estiver localizado na subárvore de distribuição o fato de mudá-lo para outro nó da subárvore não afeta o custo de largura de banda. Para usuários fracos e moderadamente concentrados a subárvore de distribuição geralmente contém nós próximos à raiz da árvore de distribuição. Desta forma, o custo de largura de banda (por sessão e total) é quase o mesmo para todos os níveis da árvore de distribuição. Enquanto que para usuários fracos e moderadamente concentrados o nível em que o servidor de controle está localizado não tem um impacto no custo de largura de banda, para usuários altamente concentrados o nível ótimo de localização está em cerca de dois níveis acima dos *head ends* (cerca de 0.7 da profundidade normalizada). A partir deste nível a probabilidade de que o servidor de controle esteja localizado em nós da subárvore de distribuição é grande. É por isto que o custo de largura de banda permanece praticamente constante do nível 0.7 ao nível 1.0. Embora o número de usuários por sessão não tenha um impacto significativo na localização ótima do servidor de controle, a medida que o número de usuários por sessão aumenta o custo diminui discretamente devido ao aumento do grau de compartilhamento do fluxo de vídeo. A redução do custo de banda passante devido ao aumento do número de participantes por sessão pode ir de 8% para a concentração fraca de usuários a 25% para a concentração alta.

Pode-se facilmente entender o impacto da introdução da política de compartilhamento de fluxo comparando estes resultados com os resultados de redes *sem* compartilhamento de fluxo. Em redes *sem* compartilhamento de fluxo, à medida que a distribuição dos participantes se torna mais concentrada, o nível ótimo desloca-se do nível da raiz em direção ao nível dos *head ends* e o número de participantes pode influenciar a localização ótima do servidor para a concentração moderada de usuários.

O custo total de replicação de servidores no  $l$ -ésimo nível é dado por:

$$C_s(l) = \gamma_s \sum_{j=1}^{d^l} \sum_{i=1}^{N_p} z(i/x_j)$$

em que:

$x_j$  - é a demanda do  $j$ -ésimo servidor, i.e., a taxa entre o número de sessões DHT servidas pelo servidor  $j$  e o número total de sessões DHT.

$\gamma_s(l)$  - é a constante de normalização para o nível  $l$ .

O custo total normalizado para a replicação no nível  $l$  é dado por  $C_b(l) + C_s(l)$ .

Considerando-se a Figura 2.13 nota-se que, para concentrações fracas e moderadas de usuários, o custo total normalizado é quase constante até o nível 0.3. A partir deste ponto o custo aumenta rapidamente. Como já foi observado antes, para estes tipos de distribuição, o custo de largura de banda é quase o mesmo independente do nível de localização do servidor. Através da replicação de servidores reduz-se a demanda de banda passante em cada servidor e conseqüentemente diminui-se seus custos individuais. Para níveis perto da raiz da árvore, a redução do custo devido a diminuição dos requisitos de banda passante de cada servidor tende a compensar o número de servidores. Para níveis mais profundos do que o nível 0.3 o crescimento do número de servidores domina o custo da rede. Para usuários altamente concentrados e até o nível 0.4 (nível ótimo), custo de largura de banda diminui mais rapidamente do que o custo de servidor aumenta. A partir deste ponto o custo de servidor domina o custo da rede. Adicionalmente, observa-se que o número de usuários por sessão de DHT não produz impacto na localização do nível ótimo.

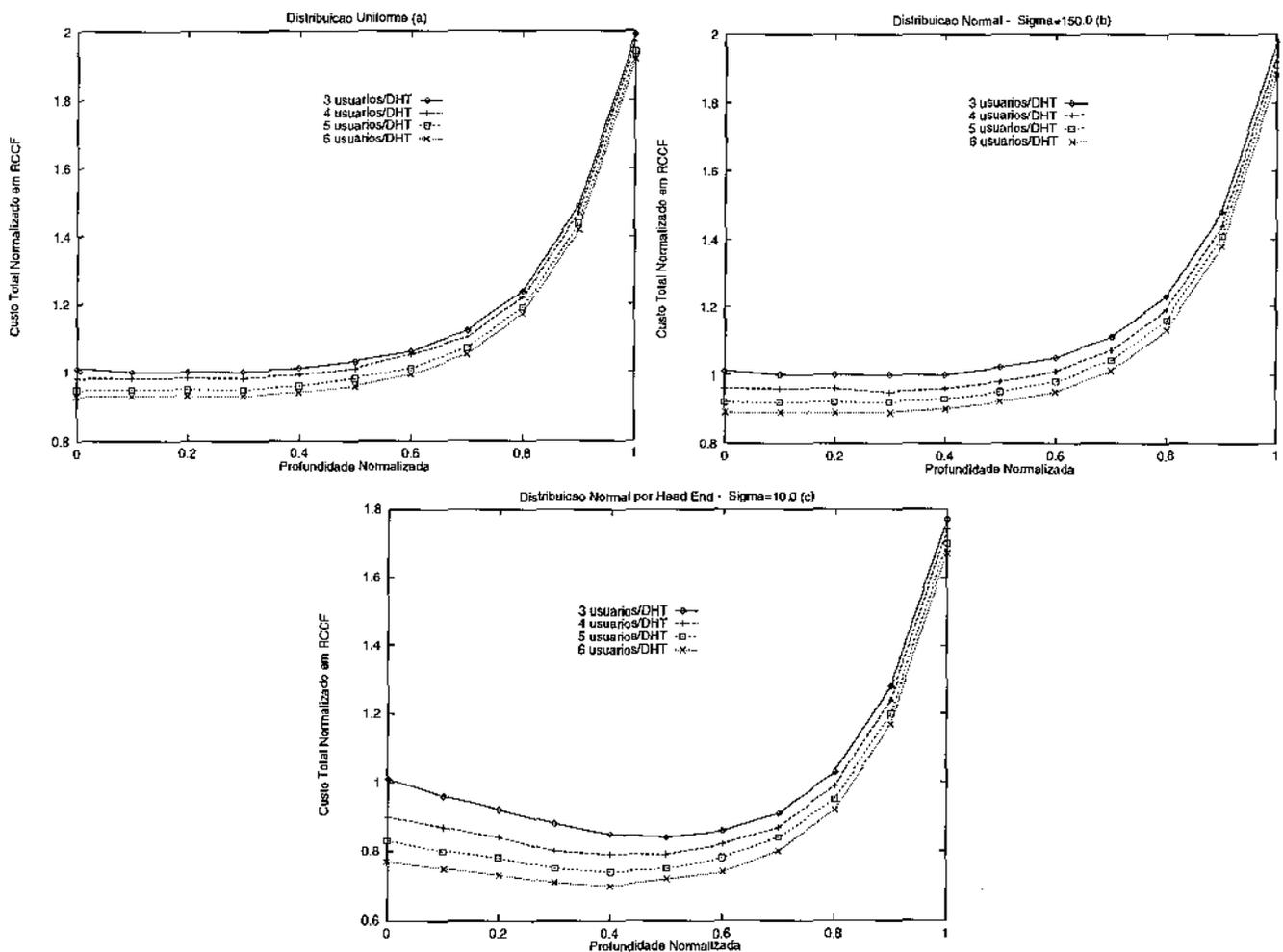
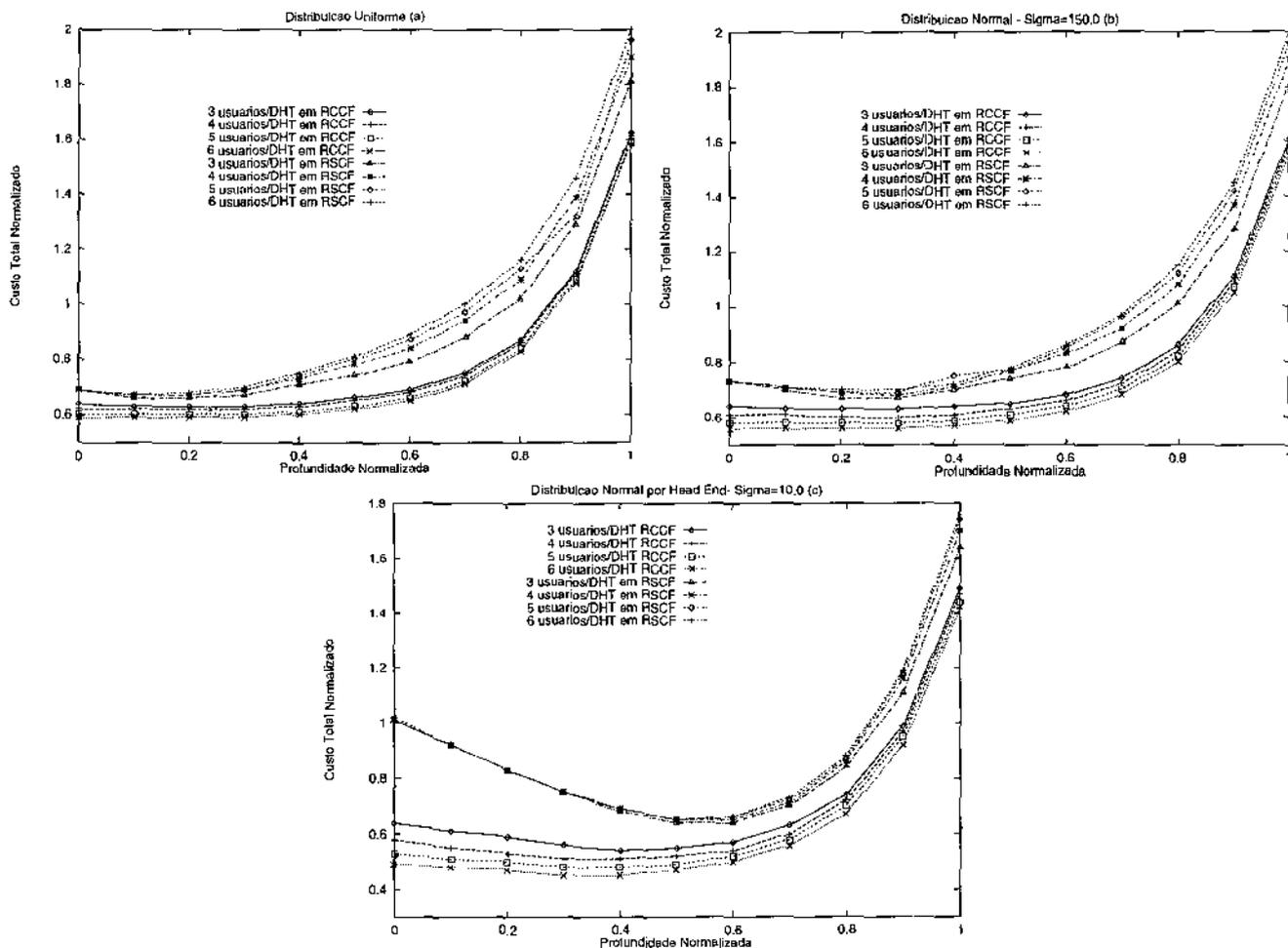


Figura 2.13: Custo total normalizado em RCCF x profundidade normalizada para: i) número diferente de usuários por sessão de DHT, ii) distribuição uniforme, iii) distribuição normal com  $s=150$  e iv) distribuição normal por *head end* com  $s=10$ .

Para números maiores de usuários por sessão, o custo da rede diminui devido a redução do custo de banda passante. Esta tendência é mais significativa para usuários altamente concentrados e a economia total pode chegar a 25%. Para um mesmo conjunto de sessões de DHT, quando o custo total de uma RSCF é comparado com o custo de RCCF, nota-se uma economia que varia de 40% a 50% para o maior número de usuários por sessão de DHT. Esta diferença corresponde ao nível de replicação de maior custo nas RSCF. A diferença mínima ocorre no nível ótimo para as RSCF e pode chegar a 27%. A Figura 2.14 mostra uma comparação das políticas das RSCF e das RCCF e a Tabela 2.1 mostra, em porcentagens, a margem de ganho no custo total obtido do uso da política de RCCF.

Para concentrações fraca e moderada de usuários a curva do custo total tem formato similar às curvas em RSCF. Entretanto, nas RSCF o custo de largura de banda é o fator dominante do custo total. Para RSCF e usuários altamente concentrados, o nível ótimo de colocação do servidor de controle (0.6) é mais próximo do nível dos *head ends* do que para as RCCF.



**Figura 2.14:** Comparação dos custos totais de replicação das políticas de RCCF e RSCF, para i) distribuição uniforme (Figura 2.14.a), ii) distribuição normal geral com  $\sigma=150$  (Figura 2.14.b) e iii) distribuição normal por *head end* com  $\sigma=10$  (Figura 2.14.c).

Tabela 2.1 Ganhos (em %) no custo total da rede da política de RCCF quando comparada à política de RSCF .

Usuários por sessão DHT	DISTRIBUIÇÃO		
	Fraca	Moderada	Alta
3 usuários	5% - 23%	6% - 25%	12% - 37%
6 usuários	12% - 47%	22% - 45%	27% - 52%

A Figura 2.15 mostra a influência da atribuição de pesos diferentes aos custos de largura de banda e de replicação de servidor. Pode-se notar que a medida que o peso do custo de banda passante diminui o custo total também diminui e o nível ótimo para colocação de servidores se aproxima da raiz da árvore de distribuição, tanto para a Figura 2.15.a e para a Figura 2.15.b. A influência do compartilhamento de fluxo pode ser notada pela comparação da Figura 2.15.b com a Figura 2.7.b. Na Figura 2.7.b o nível ótimo de colocação do servidor é em torno do nível 0.5, mesmo para um menor peso do custo de largura de banda. Já na Figura 2.15.b nota-se que o nível ótimo é perto da raiz, o mesmo nível da Figura 2.15.a. Isto ocorre porque o compartilhamento de fluxo acarreta uma grande diminuição no custo de largura de banda e mesmo para a distribuição mais concentrada (Figura 2.15.b) esta diminuição compensa a necessidade de replicação de servidores em nós mais próximos dos *head ends*.

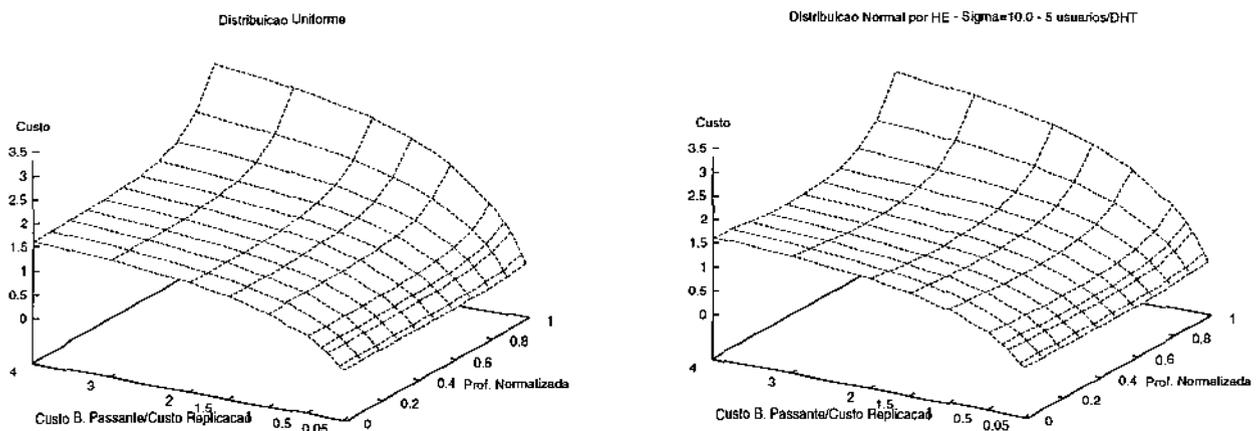


Figura 2.15: Custo total normalizado x profundidade normalizada para RCCF x r para i) 5 usuários por sessão DHT, ii) distribuição uniforme (Figura 2.15.a) e iii) distribuição normal por head endhead end com  $s=10.0$  (Figura 2.15.b)

A Figura 2.16 mostra o custo total de replicação para RCCF com diferentes topologias. Foi utilizada uma rede contendo 4096 *head ends* e distribuição normal com  $\sigma=650$ . Na Figura 2.16.a as curvas encontram-se normalizadas por um único valor, de forma a permitir a comparação absoluta de seus valores. À medida que

aumentamos o grau da árvore o custo total diminui devido a redução do custo de banda passante. A rede 4-ária chega a obter uma redução de 45% no custo total, se comparada a rede 2-ária. Para a rede 16-ária esta redução chega a 65%, também se comparada a rede 2-ária. Percebe-se que a redução apresentada aqui devido ao aumento do grau da árvore é menor do que o aumento verificado para RSCF. Isto se deve ao fato de que em RCCF a medida que o grau da árvore aumenta a quantidade de canais que podem ser compartilhados por sessão DHT diminui. Na Figura 2.16.b as curvas encontram-se normalizadas por seus respectivos valores máximos, de forma a permitir a comparação de suas tendências. Verifica-se na Figura 2.16.b que a topologia não tem grandes impactos nos resultados. Aqui também as três curvas têm formato e comportamento semelhante nas mesmas profundidades normalizadas.

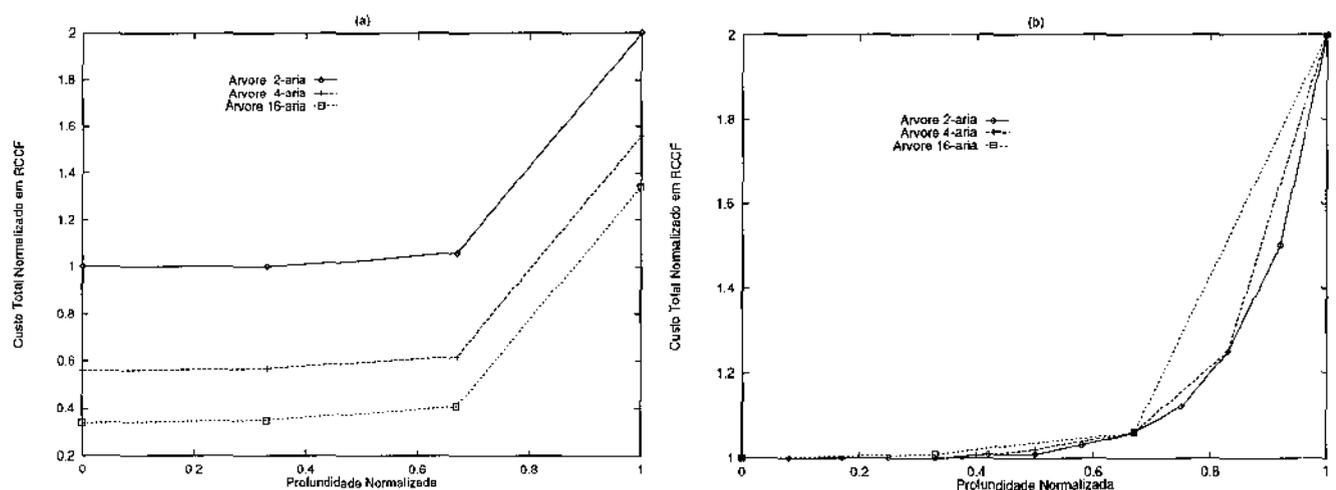


Figura 2.16: Custo total normalizado em RCCF x profundidade normalizada, para topologias diferentes.

### 2.3.2 Caching de Programas

Para cada sessão DHT é designado um *cache* de controle no nível  $l$ , i.e., um *cache* que lida com todos os pedidos desta sessão. O cálculo dos custos de largura de banda e de replicação de *cache* é equivalente ao mostrado na sessão 2.2.5. A única alteração refere-se ao cálculo do custo de largura de banda que aqui inclui o compartilhamento de fluxo como mostrado na sessão 2.3.1. A Figura 2.17 mostra o custo total da rede como uma função da profundidade normalizada para tamanhos diferentes de *cache*. É evidente que a estratégia de *caching* não traz ganhos no custo. O custo da rede aumenta à medida que aumentamos o número de *caches* (o custo de banda é constante). A estratégia de *caching* também não vale a pena ser adotada para usuários altamente concentrados. Os ganhos provenientes do fato de se ter pequenos repositórios não compensam a penalidade pelos erros de *cache* (*cache miss*). Nota-se também que o nível ótimo de colocação (0.4) é o mesmo para a replicação de servidores.

Nas RCCF o nível ótimo de colocação (0.4) é o mesmo da replicação de servidores. De [29] sabe-se que em RSCF a estratégia de *caching* também não é atrativa quando comparada aos custos obtidos pela estratégia de replicação. Nestas redes (RSCF), para concentrações fracas e moderadas de usuários o custo total da rede é quase constante até o nível 0.3. Após este ponto o custo cresce rapidamente. Para usuários altamente concentrados, o nível ótimo de colocação de servidores é por volta do nível 0.6. A diferença entre os níveis ótimos destas duas estratégias pode ser explicada pela enorme quantidade de banda passante que uma sessão de DHT requer em RSCF.

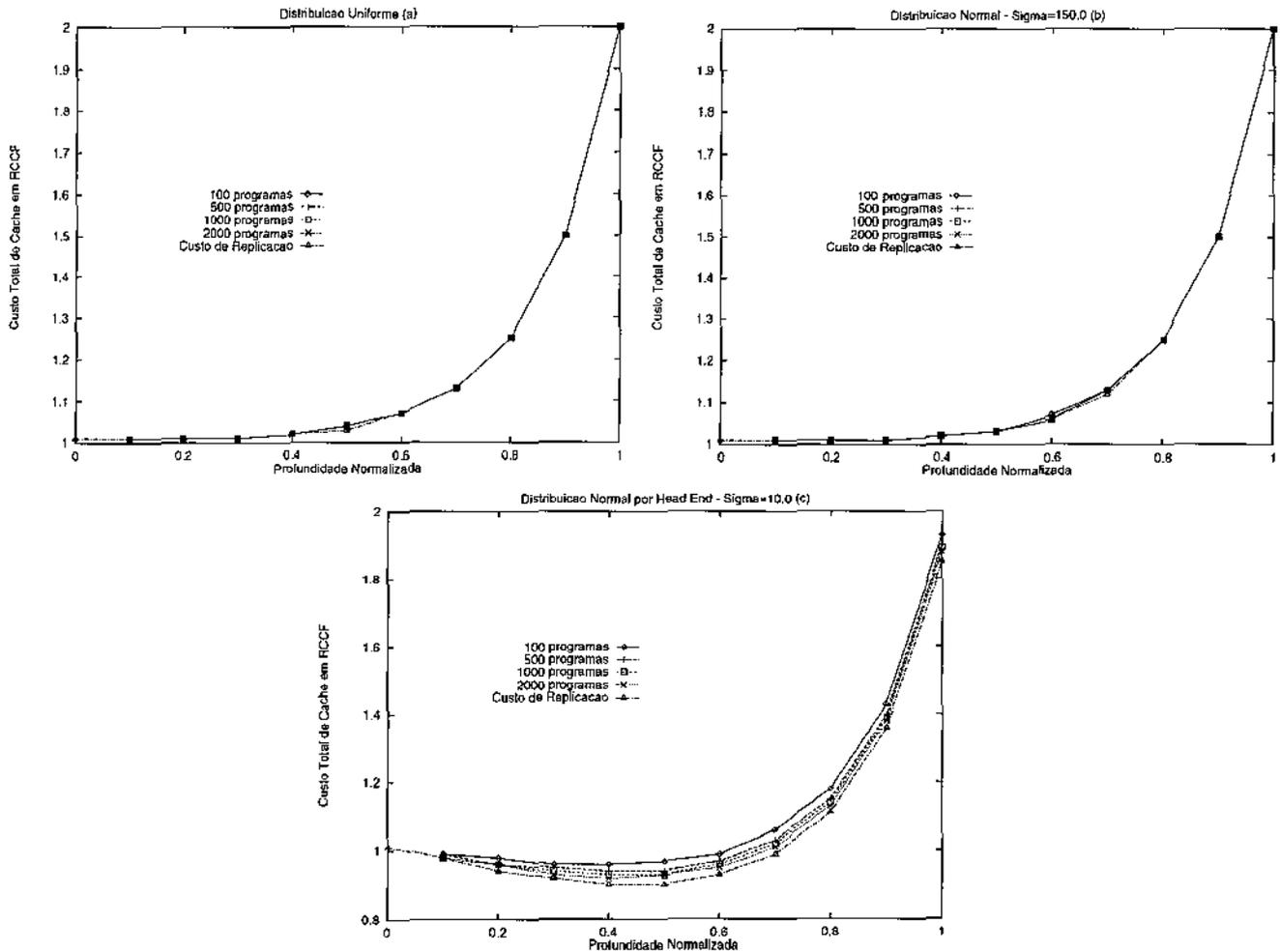


Figura 2.17: Custo total de *cache* em RCCF x profundidade normalizada para: i) tamanhos diferentes de *cache*, ii) 5 usuários por sessão DHT, iii) distribuição uniforme (Figura 2.17.a), iv) distribuição normal com  $\sigma=110$  (Figura 2.17.b) e v) distribuição normal por *head end* com  $\sigma=5$  (Figura 2.17.c).

A comparação dos custos totais mostra que a introdução da política de compartilhamento de fluxo pode trazer ganhos da ordem de 50% no custo total de replicação de *cache*, quando comparados aos custos de *caches* nas RSCF e tomando-se 2000 programas por *cache*. Os ganhos são maiores para concentrações altas de usuários

(até 50%) do que para concentrações fracas/moderadas (até 35%). A Figura 2.18 ilustra uma comparação destas duas políticas e a Tabela 2.2 quantifica os ganhos mostrando seus valores mínimos e máximos.

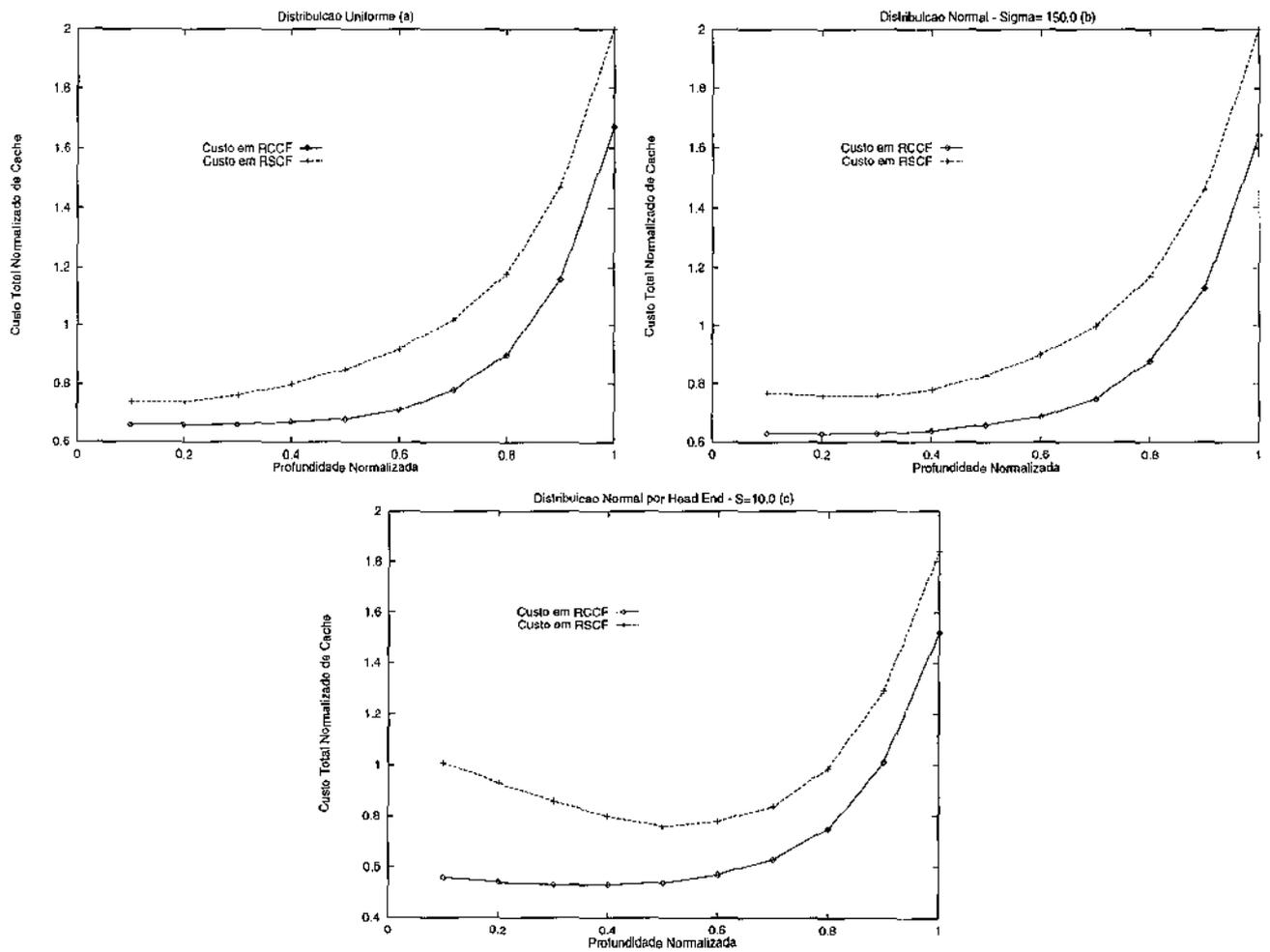


Figura 2.18: Comparação dos custos totais da replicação de *cache* para as políticas de RCF e RSCF, 2000 programas no *cache* e 5 usuários/DHT, para i) distribuição uniforme (Figura 2.18.a), ii) distribuição normal com  $\sigma=150$  (Figura 2.18.b) e iii) distribuição normal por *head end* com  $\sigma=10.0$  (Figura 2.18.c).

Tabela 2.2 Ganhos (em %) no custo de replicação de *cache* em RCCF quando comparada às RSCF.

	DISTRIBUIÇÃO		
Usuários por sessão DHT	Fraca	Moderada	Alta
5 usuários	11% - 35%	17% - 25%	17% - 50%

### 2.3.3 RCCF com Serviços de VOD e DHT

Nesta sub seção introduz-se RCCF que oferecem serviços tanto de VOD quanto de DHT. A Figura 2.19 mostra o custo total da rede para replicação de servidores com função da profundidade normalizada para porcentagem diferentes de usuários envolvidos em sessões de DHT. Tanto o custo de largura de banda quanto o custo de replicação foram normalizados pelos seus respectivos máximos da curva com 50% de DHT. Pode-se notar que o nível ótimo para replicação de servidores é 0.7 independente da distribuição dos usuários. Este comportamento é altamente influenciado pelo custo de fornecimento dos serviços de VOD. Para níveis perto da raiz nota-se que redes com baixas porcentagens de serviços de DHT custam mais do que redes com altas porcentagens de DHT (50%). Em um determinado nível, esta característica é revertida e o custo das redes com alta porcentagens de usuários envolvidos em serviços de DHT excede o custo das redes com baixas porcentagens de DHT. Este fato ocorre porque o custo dos serviços de VOD decrescem continuamente à medida que a replicação se aproxima do nível dos *head ends* e em um determinado ponto o custo de largura de banda dos serviços de DHT começam a dominar o custo total. Desta forma, a partir deste ponto redes com grandes porcentagens de serviços de DHT custam mais que redes com pequenas porcentagens deste serviços. A localização deste “ponto de reversão” depende da distribuição dos usuários. Para concentrações fracas e moderadas o ponto de reversão se encontra no nível 0.1 e 0.3, respectivamente. Para este tipo de distribuição o custo de banda passante é quase constante não importando o nível da rede e domina o custo total nos níveis perto da raiz. Para usuários altamente concentrados o custo de banda passante decresce, para os serviços de VOD e de DHT, a medida que se aproxima do nível dos *head ends* e seu ponto de reversão ocorre no nível 0.7.

Na avaliação dos ganhos obtidos pela introdução da política de compartilhamento de fluxo nota-se, obviamente, que os ganhos no custo aumentam a medida que o número de usuários envolvidos em serviços de DHT também aumenta (este trabalho não considera o compartilhamento de fluxo entre usuários dos serviços de VOD - *piggybacking*). Para redes com 50% de usuários envolvidos em DHT os ganhos no custo podem chegar a 55%. Para redes com 10% de DHT este valor pode chegar a 10%.

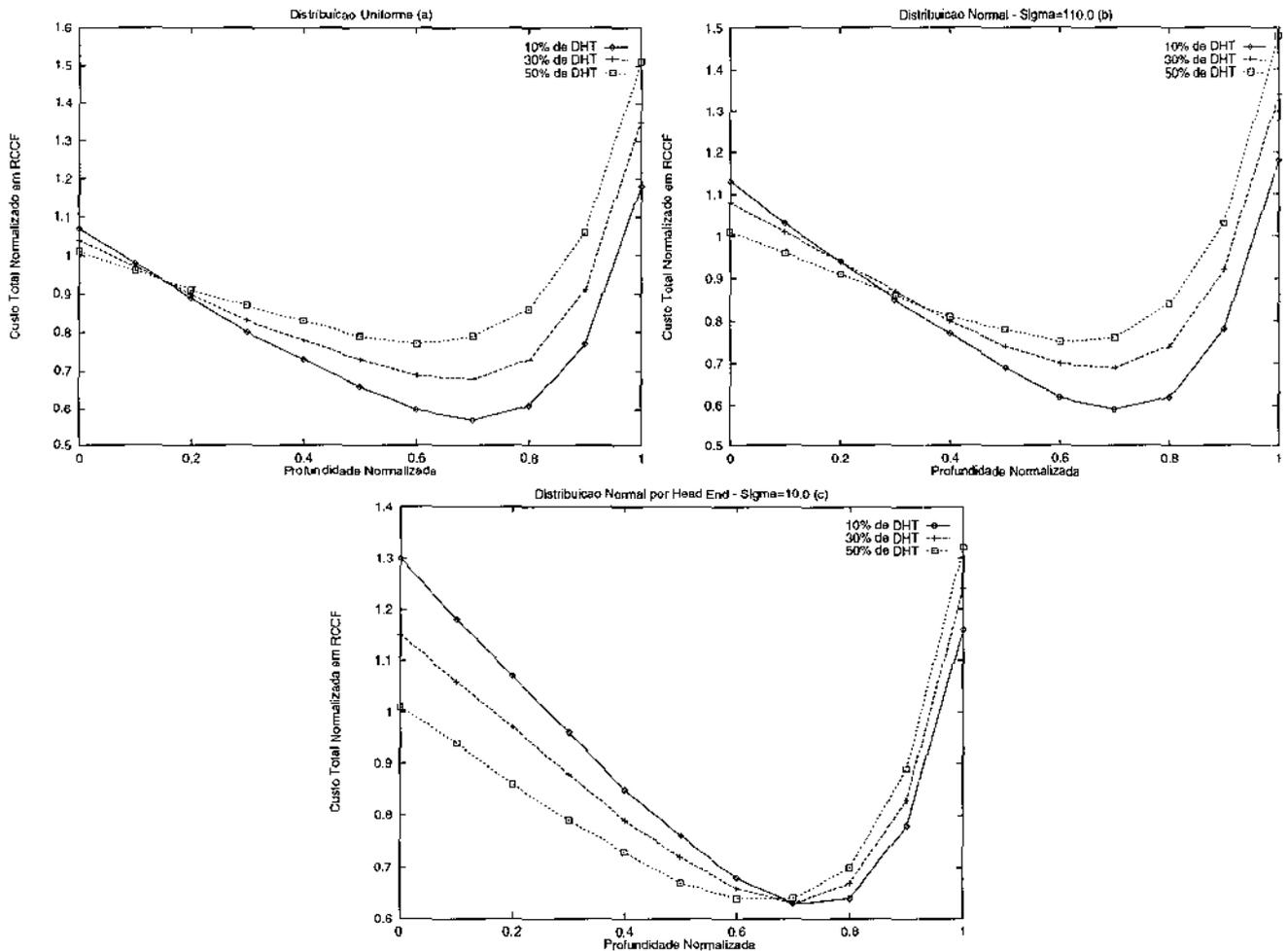


Figura 2.19: Custo total normalizado em RCCF x profundidade normalizada considerando a replicação de servidores com serviços de VOD e DHT para: i) 5 usuários por sessão de DHT, ii) distribuição uniforme (Figura 2.19.a), iii) distribuição normal com  $\sigma=110$  (Figura 2.19.b) e iv) distribuição normal por *head end* com  $\sigma=5$  (Figura 2.19.c).

### 2.3.4 Principais Resultados para RCCF

A seção 2.3 avalia a introdução da estratégia de compartilhamento de fluxo para o oferecimento de serviços de DHT. Nota-se que o número de usuários por sessão pode influenciar o custo total da rede devido a redução do custo de banda passante. Os ganhos no custo total pela adoção desta política pode ser da ordem de 50% e variam conforme o grau de compartilhamento, i.e., os ganhos são maiores para usuários altamente concentrados do que para usuários fraca/moderadamente concentrados. O nível ótimo para localização da replicação de servidores em RCCF é em torno da raiz, para usuários fraca/moderadamente concentrados, enquanto que para usuários altamente concentrados é em torno do nível normalizado 0.4. Em redes que oferecem serviços de DHT e de VoD os benefícios do compartilhamento de fluxo são maiores em redes com alta porcentagem de usuários envolvidos em serviços de DHT, nos quais o compartilhamento acontece em maior grau.

## 2.4 Redes com Servidores Distribuído (RCSD)

Em redes com servidores distribuídos (RCSD), o servidor mais próximo a um usuário é que fornece o fluxo de vídeo para ele. Somente mensagens de controle são trocadas entre os servidores que suportam uma sessão de DHT. Esta solução requer uma arquitetura mais complexa para lidar com as questões de sincronização. A Figura 2.20 ilustra uma rede com servidores distribuídos.

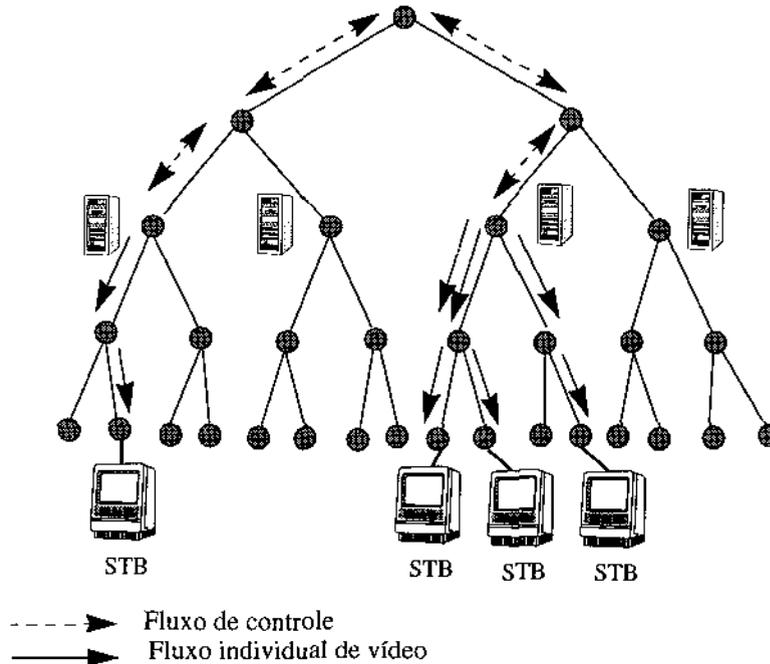


Figura 2.20: Exemplo de uma rede com servidores distribuídos (RCSD) e replicação de servidores no nível 2.

A análise das redes com servidores distribuídos é idêntica à análise de redes que oferecem serviços de VOD [22]. Desta forma, a distribuição dos usuários não influencia o custo da rede.

### 2.4.1 Replicação de Servidores

Um servidor localizado em um nó do  $l$ -ésimo nível fornece fluxos de vídeo para todos os usuários conectados a HEs que são descendentes deste nó. Desta forma o custo total de largura de banda é dado por:

$$C_b(l) = (L(d) - l + 1) \times U$$

em que:

$U$  - é o número de assinantes do serviço (usuários)

$L(d)$  - é a altura da árvore  $d$ -ária

O custo total de replicação de servidor no nível  $l$  é dado por

$$C_s(l) = \gamma_s \left( d^l \times \sum_{i=1}^{N_p} z(i/x_j) \right)$$

em que:

$x_j = U / d^l$  - é a demanda do  $j$ -ésimo servidor

$\gamma_s$  - é a constante de normalização

A Figura 2.21 ilustra o custo da rede como função da profundidade normalizada. O custo de largura de banda decresce continuamente à medida que a replicação é feita nos níveis mais próximos dos head ends. Até o nível 0.7 a taxa com que o custo de largura de banda decai é maior do que a taxa com que o custo de replicação de servidor aumenta. Após este nível, esta característica é invertida e a colocação de servidores em níveis mais profundos aumenta o custo total. As RSCF com usuários altamente concentrados apresentam um custo similar às RCSD. A diferença entre elas é que o nível ótimo para as RSCF é o nível normalizado 0.6. Este nível ótimo é basicamente ditado pelo custo de largura de banda (o nível ótimo para o custo de largura de banda também é o nível 0.6). Nas RSCF, para distribuições fraca e moderadamente concentradas o formato da curva do custo total da rede é bastante diferente. A curva do custo total é praticamente plana até o nível 0.3. Isto acontece porque a variação do custo de banda e do custo de replicação é bastante pequena nestes níveis. À medida que a profundidade aumenta, o custo total aumenta devido ao crescimento do custo de banda passante e do custo de armazenamento.

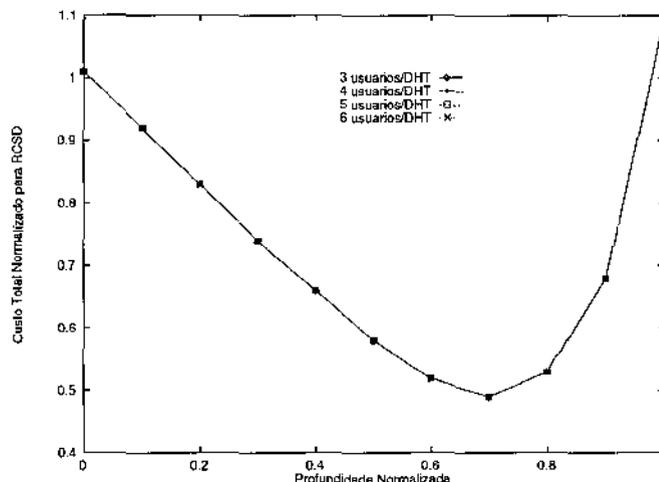
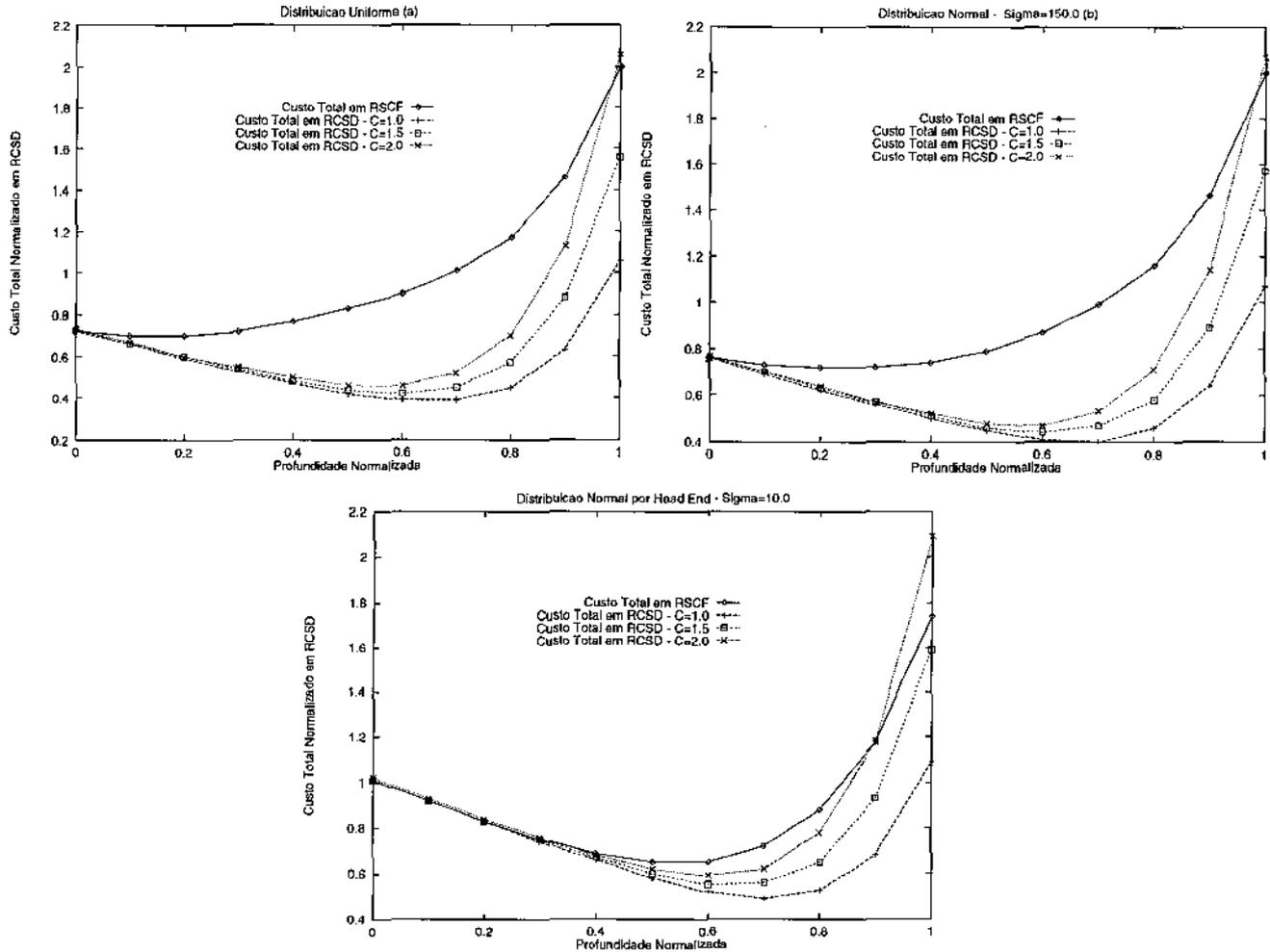


Figura 2.21: Custo total normalizado x profundidade normalizada, para uma rede com servidores distribuídos.

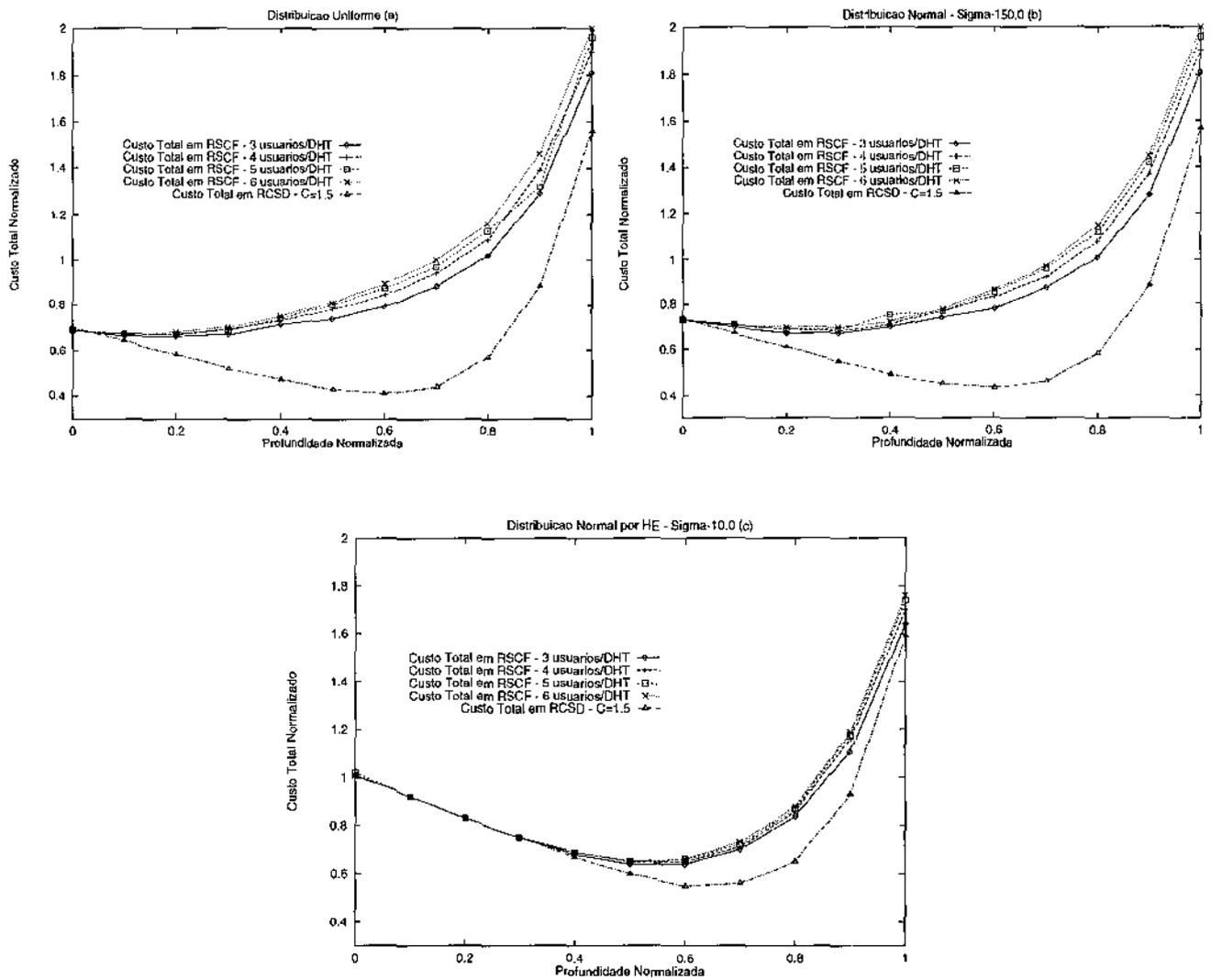
Para permitir o entendimento da introdução da política de servidores distribuídos, quando comparado às duas políticas anteriores, define-se  $C$  como sendo a taxa entre o custo de um servidor distribuído e um servidor padrão (usado em RSCF e em RCCF). Considera-se que, nos casos reais, o custo de um servidor distribuído será no máximo o dobro do custo de um servidor padrão ( $C = 2$ ).



**Figura 2.22:** Comparação do custo total de replicação das RSCF e das RCSD para: i) 5 usuários por sessão, ii) distribuição uniforme (Figura 2.22.a), iii) distribuição normal com  $\sigma=150$  (Figura 2.22.b) e iv) distribuição normal por *head end* com  $\sigma=10.0$  (Figura 2.22.c).

A Figura 2.22 mostra, para 5 usuários por sessão, o custo da rede para replicação de servidores em RSCF e em RCSD. Nota-se que, para concentrações fracas/moderadas de usuários, obtêm-se um enorme ganho no custo total em praticamente qualquer nível da replicação. Para usuários altamente concentrados, a política de servidores distribuídos não apresenta vantagens para replicação em níveis mais altos que o nível ótimo (0.6), e ganhos consideráveis podem ser obtidos se o servidor distribuído tiver o mesmo custo do servidor padrão. Isto é

explicado porque, em RSCF, o custo de largura de banda para altas concentrações de usuários é bem menor do que para concentrações fracas/moderadas.



**Figura 2.23:** Comparação dos custos totais para as políticas de RSCF e RCSD, para  $C=1.5$ , diferentes números de usuários e i) distribuição uniforme (Figura 2.23.a), ii) distribuição normal geral com  $\sigma=150.0$  (Figura 2.23.b) e iii) distribuição normal por *head end* com  $\sigma=10.0$  (Figura 2.23.c)

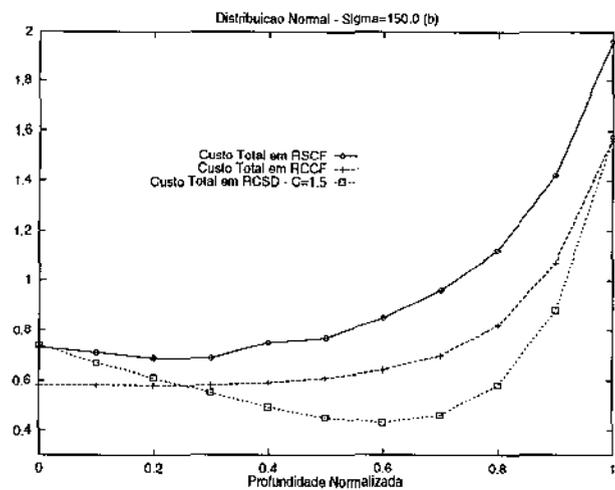
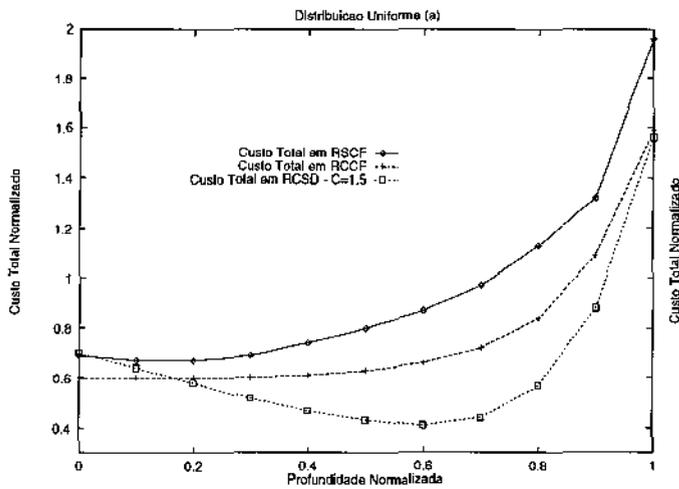
As RCSD, quando comparadas às RSCF, garantem redução no custo total devido a economia de largura de banda. A influência do número de usuários por sessão nesta comparação é mostrada na Figura 2.23, para  $C=1.5$ . Os ganhos variam de acordo com o número de usuários por sessão e com a distribuição dos usuários. Os ganhos variam também de acordo com o valor de  $C$ , aumentando a medida que  $C$  diminui. Quanto maior o número de usuários por sessão maior é o ganho. Isto vem do fato de que, para a política de RSCF, o aumento do número de usuários por sessão aumenta o custo total. Os ganhos também são maiores para distribuições fracas/

moderadas devido aos seus altos requisitos de largura de banda. A Tabela 2.3 exemplifica os valores máximos destes ganhos para  $C=1.5$ .

Tabela 2.3 Ganhos (em %) do custo total das RSCF quando comparadas às RCSD

Distribuição			
Número de usuários/ sessão DHT	Fraca	Moderada	Alta
3 usuários	50%	47%	23%
6 usuários	56%	52%	26%

Comparando os valores da Tabela 2.1 e da Tabela 2.3 observa-se que, quando comparada às RSCF, a adoção da estratégia de compartilhamento de fluxo é mais interessante para usuários que apresentam um padrão de concentração alto. Para usuários fraca/moderadamente concentrados a estratégia de servidores distribuídos leva a maiores ganhos. Uma comparação das três estratégias é mostrada na Figura 2.24. Para as distribuições fraca e moderadamente concentradas o custo de replicação usando servidores distribuídos é menor na maior parte dos níveis de replicação. Esta situação se reverte a medida que a concentração de usuários aumenta.



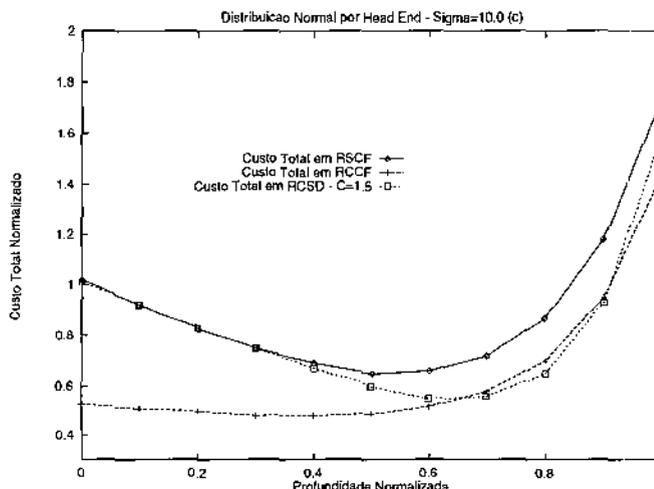


Figura 2.24: Comparação dos custos totais para RSCF, RCCF e RCSD, para i) 5 usuários por sessão de DHT, ii) distribuição uniforme (Figura 2.24.a), iii) distribuição normal com  $\sigma=150$  (Figura 2.24.b) e iv) distribuição normal por *head end* com  $\sigma=10$  (Figura 2.24.c).

A Figura 2.25 mostra o impacto da atribuição de pesos diferentes aos custos de largura de banda e de armazenamento nas RCSD. Pode-se observar que a medida que o peso do custo de banda passante diminui o custo total também cai. A curva do custo total continua mantendo seu mínimo em torno da profundidade normalizada 0.6, mas seu formato é atenuado na medida em que o peso do custo de banda passante decai, chegando até ser quase plano para  $p=0.05$ .

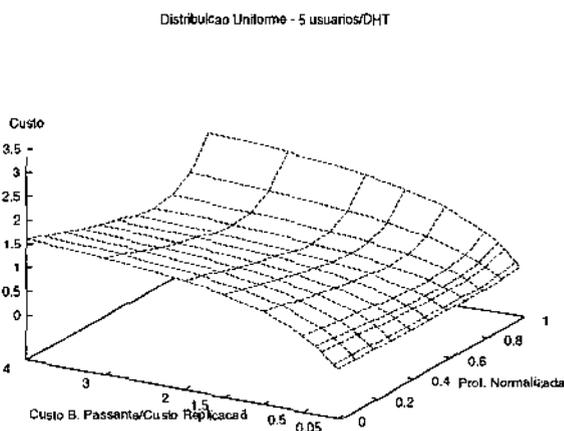


Figura 2.25: Custo total da rede x profundidade normalizada x  $p$  para RCSD.

As Figura 2.26.a e a Figura 2.26.b mostram o custo total da rede em função da profundidade normalizada para topologias diferentes. As curvas da Figura 2.26.a estão normalizadas pelo mesmo valor,

permitindo assim a comparação de seus valores absolutos. Pode-se notar claramente que quanto maior a conectividade da árvore menor o custo total de replicação. A árvore 4-ária chega a obter 45% de economia no custo total com relação à árvore binária. Este valor chega a 70% para a árvore 16-ária, também em comparação com a árvore binária. Uma observação interessante é que no nível dos *head ends* todas as três topologias apresentam o mesmo custo. Isto se deve ao fato de que nas RCSD o servidor mais próximo de um usuário é que fornece o fluxo de vídeo para este. Na Figura 2.26.b cada curva está normalizada por seu respectivo valor máximo, permitindo a comparação de suas tendências. As observações feitas para os dois casos anteriores (RSCF e RCCF) se mantêm: a topologia não produz grande impacto nos resultados gerados, as árvores de maior grau geram menor custo e as curvas possuem mesmo formato para a mesma profundidade normalizada.

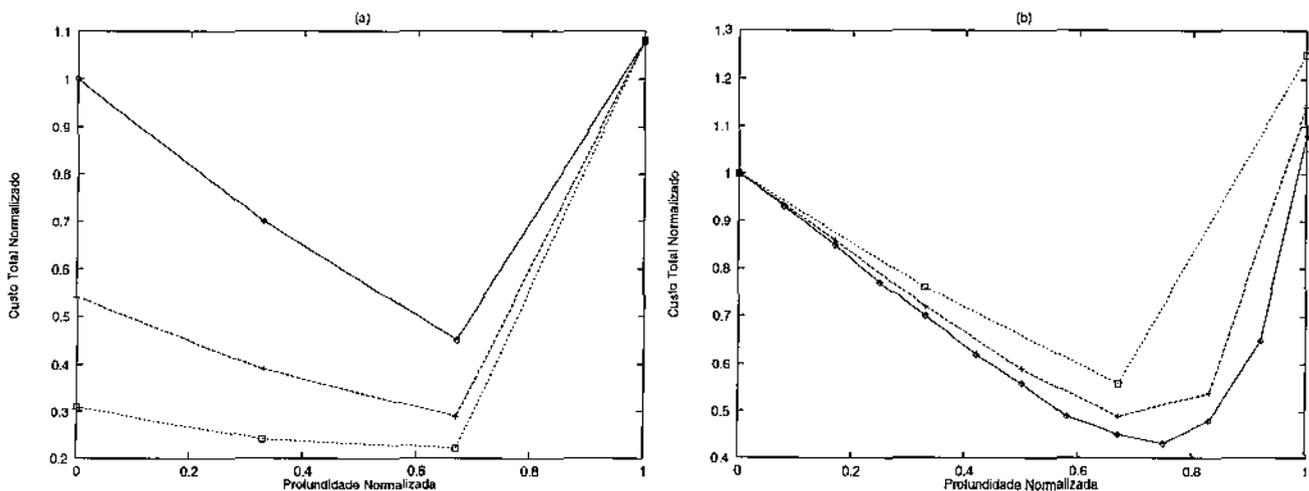


Figura 2.26: Custo total em RCSD x profundidade normalizada, para topologias diferentes.

## 2.4.2 Caching

O custo da replicação de *caches* pode ser facilmente generalizado pelo custo da expressão introduzida na seção 2.3.1. Considera-se que a demanda do *cache* localizado no nível  $l$  é igual a  $U/d^l$  e que o custo de largura de banda por usuário é igual a  $L(d) - l$ . A Figura 2.27 mostra o custo total de *cache* em redes com servidores distribuídos como uma função do custo normalizado. Nota-se que a curva de replicação de *cache* tem um mínimo na profundidade 0.7 e que tem um formato similar a curva de replicação de servidores. Além disto, observa-se que para este tipo de rede a estratégia de *caching* não é interessante de ser adotada, quando comparada com a estratégia de replicação. Os ganhos do uso da estratégia de *caching* distribuído (quando comparados ao *caching* em redes sem compartilhamento de fluxo) pode chegar a 50% para concentrações fracas/moderadas e a 40% para concentrações altas de usuários.

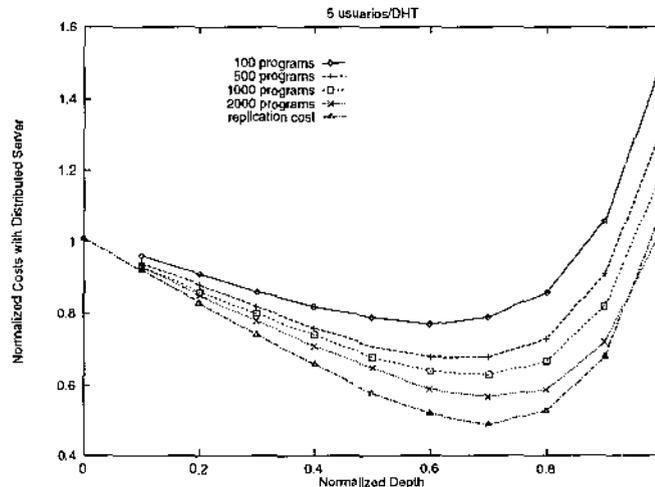


Figura 2.27: Custo normalizado de replicação de *cache* em RCSD x profundidade normalizada para tamanhos diferentes de *cache*.

### 2.4.3 Principais Resultados para RCSD

A seção 2.4 analisa a introdução da política de servidores distribuídos com finalidade de reduzir o custo total da rede. A adoção de servidores distribuídos para os serviços de DHT é uma solução bastante atrativa. Quando comparada com o custo total de RSCF oferece ganhos que podem chegar a 50%. O ganho aumenta a medida que o número de usuários por sessão devido à significativa redução de banda passante. A localização ótima para replicação, nas RSCF com usuários fraca/moderadamente concentrados é em torno do nível normalizado 0.3, enquanto que para as RCSD é em torno do nível 0.7.

## 2.5 Redes com Compartilhamento de Fluxo e Servidores Distribuídos (RCFSD)

A combinação das estratégias de compartilhamento de fluxo e servidores distribuídos é discutida nesta seção como uma extensão natural das fases anteriores desta pesquisa. Esta quarta estratégia visa diminuir ainda mais os requisitos de largura de banda das sessões DHT.

Nesta política cada usuário do serviço DHT é atendido pelo servidor mais próximo. Vários servidores diferentes podem atender uma mesma sessão DHT e apenas mensagens de controle e de sincronização são trocadas entre eles. A diferença desta estratégia para a anterior (servidores distribuídos) é que o fluxo de vídeo de uma sessão DHT é compartilhado por seus usuários até o último *switch* em comum entre eles. Esta idéia é exemplificada na Figura 2.28.

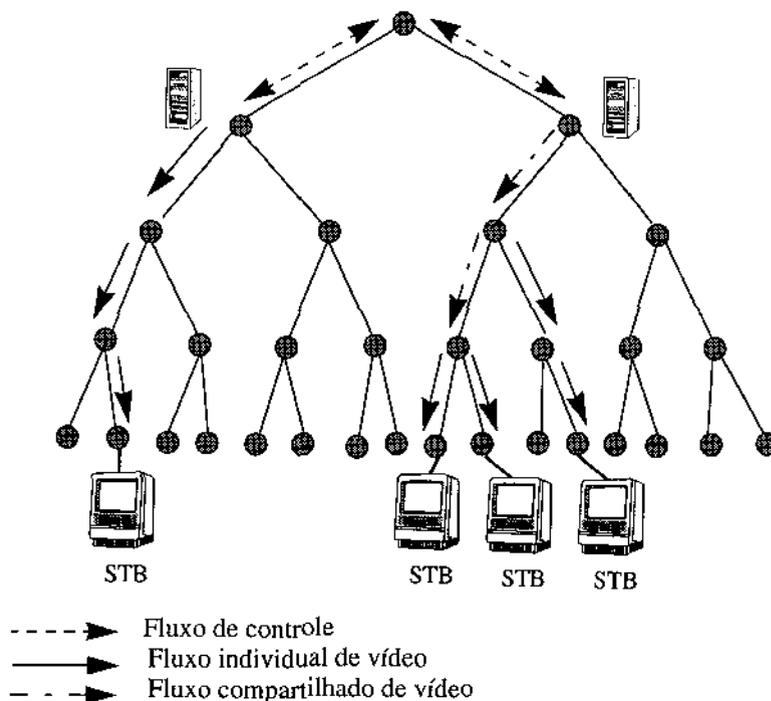


Figura 2.28: Exemplo de uma rede com servidores distribuídos e compartilhamento de fluxo para replicação de servidor no nível 1.

### 2.5.1 Replicação de Servidores

Um servidor localizado em um nó do  $l$ -ésimo nível fornece fluxo de vídeo para todos os usuários conectados a HEs que são descendentes deste nó. Assim, o custo de largura de banda da  $i$ -ésima sessão de DHT quando consideramos replicação no nível  $l$  é dado por:

$$c_i(l) = (L(d) - l) \times H_i$$

em que:

$L(d)$  - é a altura da árvore  $d$ -ária;

$H_i$  - Número de *head ends* diferentes que os usuários da  $i$ -ésima sessão ocupam;

O custo total de largura de banda é dado por:

$$C_b(l) = \gamma_b \sum_{\beta} c_i(l)$$

em que:

$\beta$  - é o conjunto de sessões DHT.

$\gamma_b$  - é a constante de normalização.

O custo total de replicação de servidor no nível  $l$  é dado por:

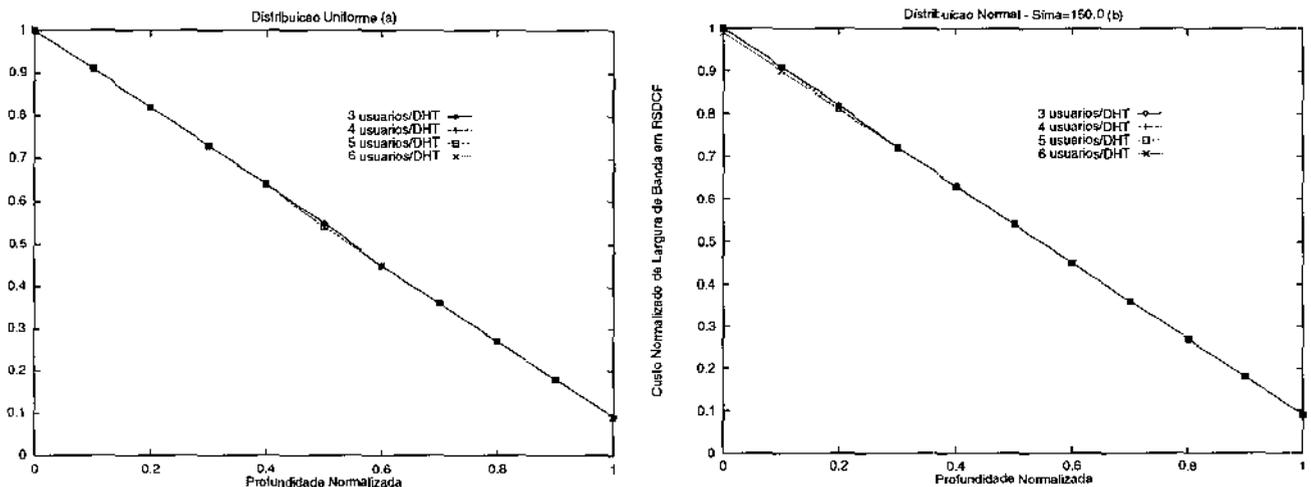
$$C_s(l) = \gamma_s \left( d^l \times \sum_{i=1}^{N_p} z(i/x_j) \right)$$

em que:

$x_j = U / d^l$  - é a demanda do  $j$ -ésimo servido, onde  $U$  é o número de assinantes do serviço (usuários).

$\gamma_s$  - é a constante de normalização.

A Figura 2.29 mostra o custo normalizado de largura de banda em função da profundidade normalizada. Percebe-se que quanto mais concentrada for a distribuição e quanto maior o número de usuários menor será o custo de largura de banda. Quanto maior for a concentração dos usuários maior é a possibilidade de que existam canais entre usuários de uma mesma sessão DHT que possam ser compartilhados. Este número de canais aumenta a medida que o número de usuários por sessão também aumenta. A combinação das estratégias de servidores distribuídos com o compartilhamento de fluxo faz com que o custo de largura de banda decresça continuamente à medida que a replicação é feita nos níveis mais altos da árvore de distribuição.



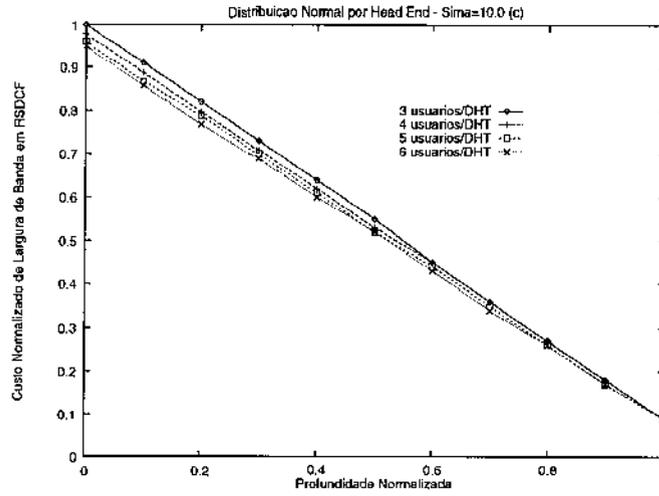
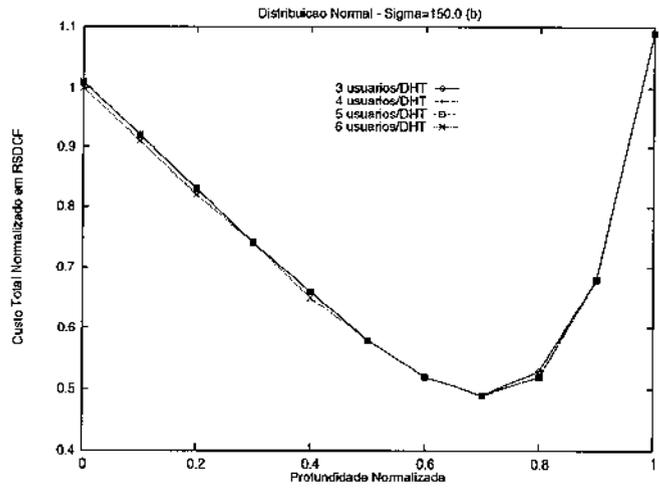
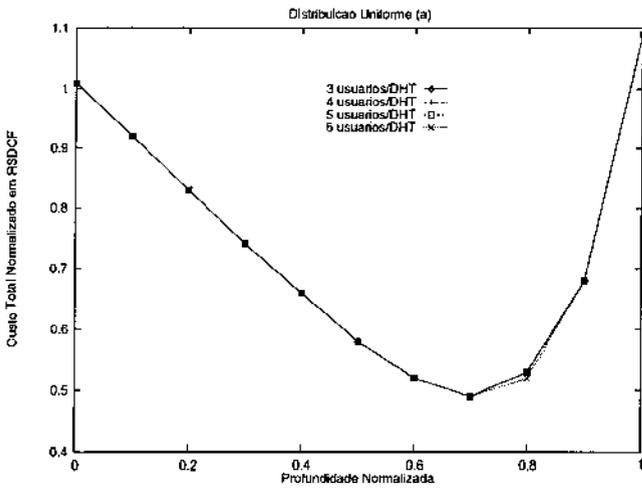
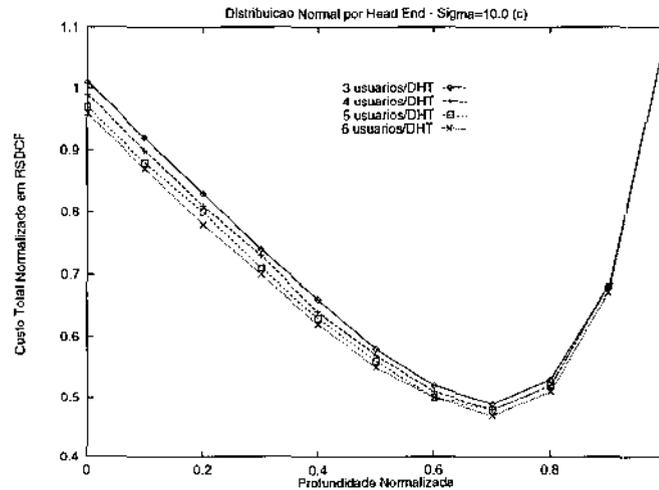


Figura 2.29: Custo normalizado de largura de banda em RSDCF x profundidade normalizada considerando a replicação de servidores para: i) diferentes números de usuários por sessão de DHT, ii) distribuição uniforme (Figura 2.29.a), iii) distribuição normal com  $\sigma=150$  (Figura 2.29.b) e iv) distribuição normal por head end com  $\sigma=10$  (Figura 2.29.c).





**Figura 2.30:** Custo total normalizado em RSDCF x profundidade normalizada considerando a replicação de servidores para: i) diferentes números de usuários por sessão de DHT, ii) distribuição uniforme (Figura 2.30.a), iii) distribuição normal com  $\sigma=150$  (Figura 2.30.b) e iv) distribuição normal por *head end* com  $\sigma=10$  (Figura 2.30.c)

A Figura 2.30 mostra o custo total de replicação em função da profundidade normalizada para RSDCF. Nota-se que o nível ótimo para a replicação de servidores (0.7) é o mesmo independente da distribuição dos usuários. A RSDCF são bastante semelhantes às redes que oferecem serviços de VoD. Em [22] mostra-se que o nível ótimo para replicação de servidores em redes com serviços de VoD é também o nível normalizado 0.7. Apesar da distribuição de usuários não ter influência no nível ótimo o mesmo não acontece com o número de usuários por sessão, principalmente para as distribuições mais concentradas. Nota-se que quanto mais concentrada a distribuição maior a influência do número de usuários por sessão no custo total da replicação. Para usuários altamente concentrados (Figura 2.30.c) nota-se que quanto maior o número de usuários por sessão menor o custo. Isto ocorre porque quanto maior o número de usuários por sessão maior a possibilidade de compartilhamento de canais.

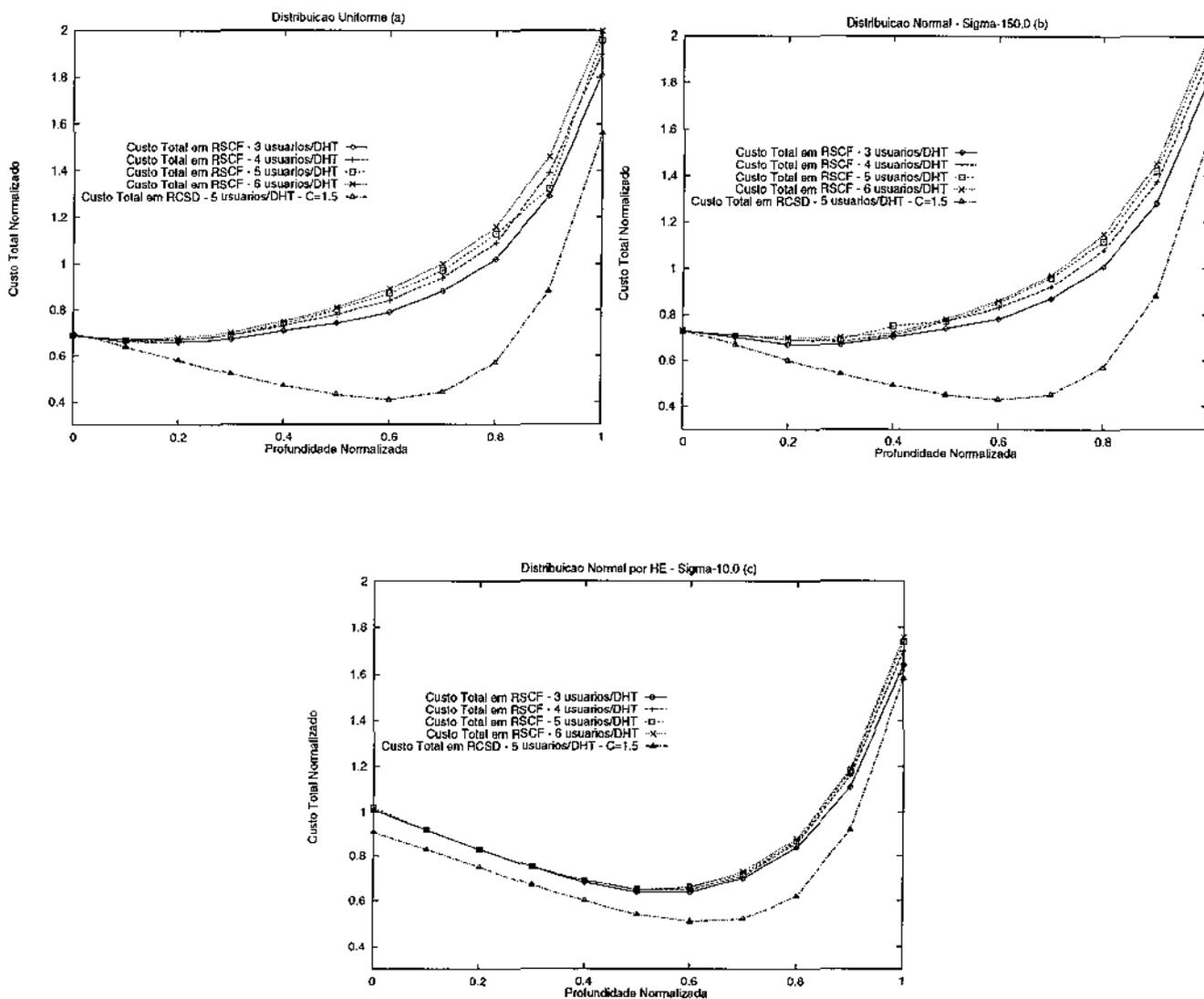


Figura 2.31: Comparação dos custos totais das RSCF e das RSDCF, para i) 5 usuários por sessão de DHT, ii) distribuição uniforme (Figura 2.31.a), iii) distribuição normal com  $\sigma=150$  (Figura 2.31.b) e iv) distribuição normal por *head end* com  $\sigma=10$  (Figura 2.31.c).

Quando comparada às RSCF as RSDCF apresentam ganhos no custo total. Este ganho é proveniente da redução do custo de banda passante vindo do uso de servidores distribuídos e do compartilhamento de fluxo entre os usuários da sessão DHT. A Figura 2.31 mostra esta comparação. Novamente defini-se  $C$  como sendo a taxa entre o custo de um servidor distribuído e o custo de um servidor padrão. Na Figura 2.31 as curvas foram traçadas considerando-se  $C=1.5$ . Como o custo total das RSDCF não sofre grandes influências do número de usuários por sessão apenas a curva de 5 usuários/DHT é mostrada. Nota-se que as RSDCF são mais atrativas para distribuições fraca/moderadas (Figura 2.31.a e Figura 2.31.b). Para este tipo de distribuição os ganhos das RSDCF sobre as RSCF chegam a 53%. Para usuários altamente concentrados este ganho chega a 30%. Os

ganhos da Figura 2.31.c são menores pois as RSCF com usuários altamente concentrados já apresentam uma economia no custo de largura de banda em relação a esta mesma rede com usuários fraca/moderadamente concentrados.

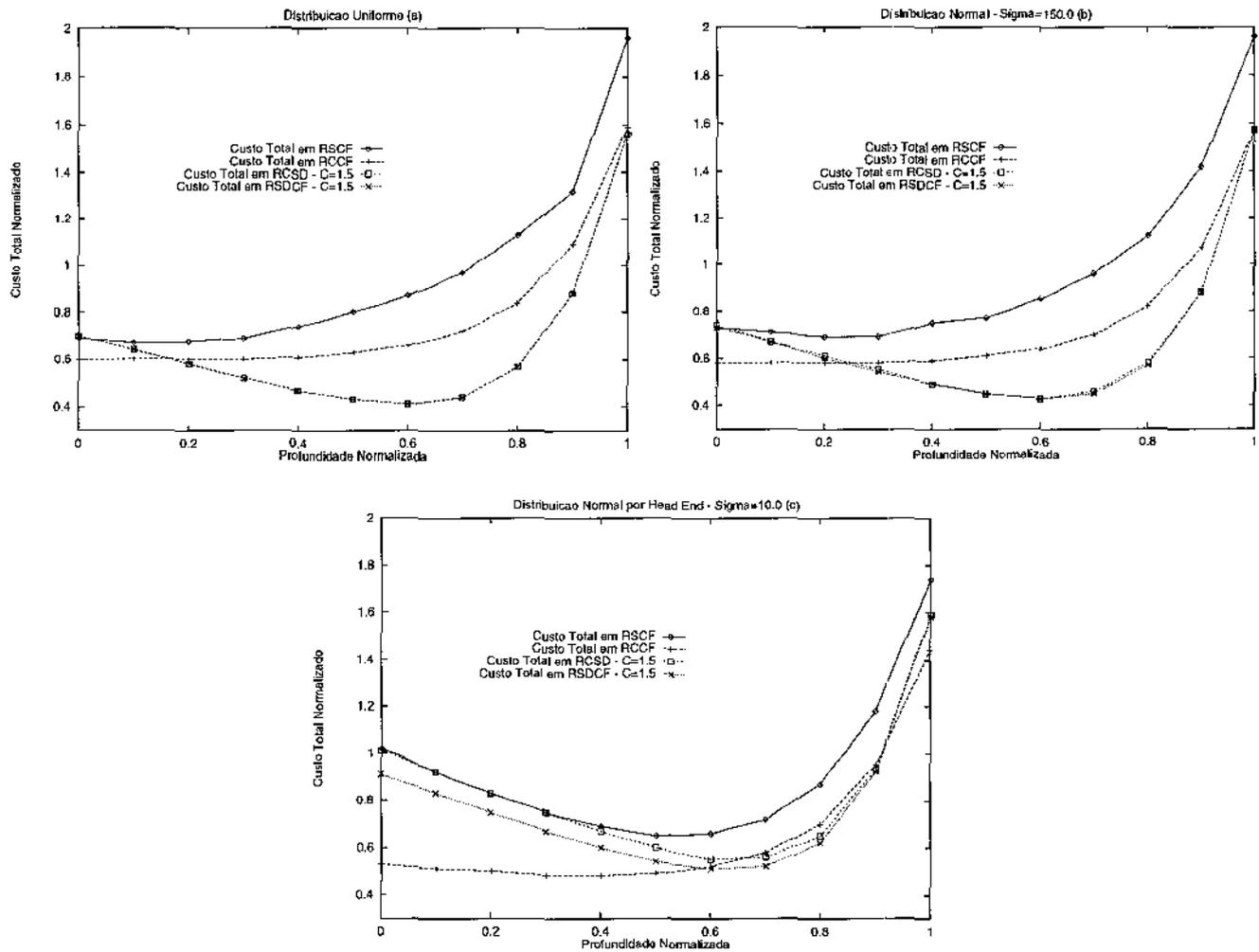


Figura 2.32: Comparação dos custos totais para RSCF, RCCF, RCSD e RSDCF x profundidade normalizada, para i) 5 usuários por sessão DHT. ii) distribuição uniforme (Figura 2.32.a), ii) distribuição normal com  $\sigma=150.0$  (Figura 2.32.b) e iii) distribuição normal por head end com  $\sigma=10.0$  (Figura 2.32.c)

A Figura 2.32 mostra uma comparação dos custos totais dos quatro tipos de redes estudados: RSCF, RCCF, RCSD, RSDCF. Nota-se que para as concentrações fracas/moderadas as RSDCF e as RCSD produzem um menor custo total em praticamente todos os níveis da árvore de distribuição. Devido a alta dispersidade dos usuários nestas distribuições as RSDCF não apresentam grandes ganhos em relação às RCSD. Isto acontece porque, para estas distribuições, o número de canais passíveis de compartilhamento em uma sessão DHT é bastante pequeno. Comparando os valores da Tabela 2.1, da Tabela 2.3 e os valores observados na Figura 2.31, percebe-se que, quando comparada às RSCF as RSDCF apresentam maiores ganhos para as distribuições

fracas/moderadas enquanto que para as distribuições concentradas as RCCF apresentam melhores ganhos no custo. Deve-se notar, entretanto, que para as RCSD e RSDCF estes ganhos estão diretamente relacionados com o custo de um servidor distribuído. Quanto maior o custo deste servidor menor será o ganho no custo total destas redes quando comparadas as RSCF e RCCF.

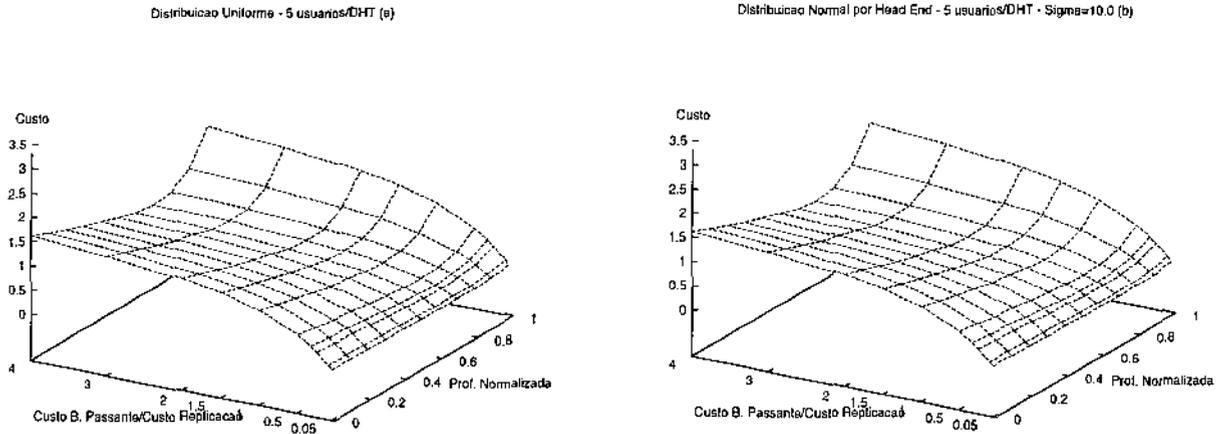


Figura 2.33: Custo total da rede x profundidade normalizada x  $\rho$  para RSDCF.

A Figura 2.33 mostra o impacto da atribuição de pesos diferentes aos custos de largura de banda e de replicação de servidores. Nota-se que a medida que o custo de largura de banda decresce o custo total também diminui e que a distribuição não tem grande impacto nesta atribuição de pesos diferentes. O menor custo é obtido em torno da profundidade 0.7, para qualquer peso de largura de banda, ou para baixos valores de custo de largura de banda, em praticamente todos os níveis da árvore de distribuição.

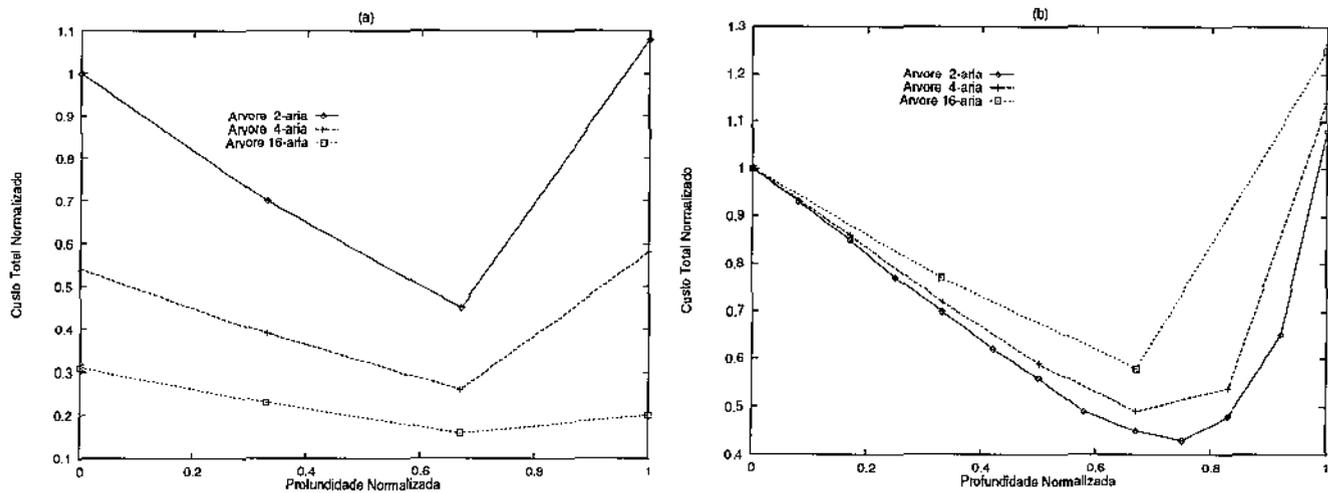


Figura 2.34: Custo total em RSDCF x profundidade normalizada, para topologias diferentes

As Figura 2.34.a e a Figura 2.34.b mostram o custo total da rede em função da profundidade normalizada para topologias diferentes. As curvas da Figura 2.34.a estão normalizadas pelo mesmo valor, permitindo assim a comparação de seus valores absolutos. Pode-se notar claramente que quanto maior a conectividade da árvore menor o custo total de replicação. A árvore 4-ária chega a obter 45% de economia no custo total com relação à árvore binária. Este valor chega a 81% para a árvore 16-ária, também em comparação com a árvore binária. Na Figura 2.34.b cada curva está normalizada por seu respectivo valor máximo, permitindo a comparação de suas tendências. Percebe-se por esta figura que a topologia não tem um impacto significativo no formato das curvas, que mantêm as mesmas tendências para os mesmos níveis da árvore.

Podemos notar aqui que dos quatro tipos de redes estudados as RSCF é que apresentam o maior ganho no custo pelo aumento do grau de conectividade da árvore de distribuição. Este valor chega a 85% quando compara-se as árvores 16-árias com as árvores binárias nestas redes.

A estratégia de replicação de *caches* mostrou-se mais cara do que a estratégia de replicação de servidores para as RCCF e para as RCSD. As RSDCF são uma combinação das duas redes anteriores, onde a redução do custo de banda passante apresenta-se ainda maior. Para as RSDCF o uso de *caches* em níveis mais próximos ao usuário também não apresentou ganhos em relação ao custo obtido pela replicação. O custo pago para acesso a servidor na raiz da árvore quando um *cache miss* ocorre não compensa a economia no custo pelo uso de unidades de armazenamento menores.

### 2.5.2 Principais Resultados das RSDCF

As RSDCF são uma combinação das RCCF e RSDCF. Estas redes apresentam grande economia no custo de banda passante devido a redução dos canais alocados para cada sessão e a introdução do compartilhamento dos canais até o último *switch* em comum entre os usuários da sessão. Nota-se que para as concentrações fracas/moderadas as RSDCF e as RCSD produzem um menor custo total em praticamente todos os níveis da árvore de distribuição, quando comparadas as RSCF e RCCF. Nota-se também que quando comparada às RSCF as RSDCF apresentam maiores ganhos para as distribuições fracas/moderadas enquanto que para as distribuições concentradas as RCCF apresentam melhores ganhos no custo.

*"And further, by these, my son, be admonished: of making many books there is no end; and much study is a weariness of the flesh"*

(E, de mais d'isto, filho meu, atenta: não há limites para fazer livros, e o muito estudar enfado é da carne)

Eclesiastes, 12:12

---

As aplicações de vídeo apresentam grande potencial de sucesso comercial na futura Rede Digital de Serviços Integrados de Faixa Larga (RDSI-FL). Estas aplicações serão também as maiores consumidoras de banda passante neste novo ambiente. Sendo assim, a compreensão dos requisitos de serviços de vídeo é de grande importância para o projeto da rede. Nesta dissertação explorou-se o compromisso entre a redução da demanda de banda passante e da replicação de servidores de vídeo para o oferecimento de serviços de *Distributed Home Theatre* (DHT). Analisou-se estratégias de replicação de servidores e de *cache*. Considerou-se também redes que oferecem serviços de VoD e de DHT. Percebeu-se que as características da rede podem influenciar substancialmente as escolhas de projeto. Avaliando-se a introdução de compartilhamento de fluxo percebeu-se que o número de usuários por sessão pode influenciar o custo total devido à redução do custo de banda passante. Esta redução pode chegar a 50%, sobre o custo total de RSCF, e varia de acordo com o número de usuários por sessão e com o grau de compartilhamento. Em redes com serviços de DHT e VoD os benefícios do compartilhamento de fluxo são mais acentuados em redes com alta porcentagem de usuários envolvidos em serviços de DHT (entre os quais o grau de compartilhamento de fluxo é maior).

A adoção de RCSD é uma solução muito atrativa para o serviço de DHT. Quando comparadas às RSCF e às RCCF os ganhos no custo total podem ser da ordem de 50%. Os ganhos aumentam à medida que o número de usuários por sessão aumenta. As RSDCF apresentam uma combinação das características das RCCF e RCSD. Estas redes podem apresentar ganhos da ordem de 50% sobre os custos das RSCF. Os ganhos são maiores pra distribuições fracas/moderadas de usuários.

O projeto de redes para o fornecimento de serviços de DHT é altamente influenciado pelas características da rede de acordo com o grau de redução no custo de banda passante apresentado por cada uma delas. Por exemplo, o nível ótimo para replicação de servidores em RSCF com usuários fraca/moderadamente concentrados é em torno do nível normalizado 0.3 enquanto que para RCSD é em torno do nível 0.7. A distribuição dos usuários e o número de usuários por sessão também influenciam o projeto da rede. O nível ótimo para replicação de servidores em RCCF e usuários fraca/moderadamente é em torno da raiz da árvore de distribuição, enquanto que para usuários altamente concentrados este nível é em torno de 0.4 da profundidade normalizada. Para RCSD variou-se a relação entre o custo de um servidor padrão e um servidor distribuído e concluiu-se que o uso de servidores distribuídos é interessante, em termos de custo, para usuários fraca/moderadamente concentrados. Entretanto para usuários altamente concentrados isto nem sempre é verdade. Em geral a replicação de servidores é uma estratégia atrativa independentemente das características da rede. Além disto, o custo de replicação de servidores é geralmente menor do que o custo de replicação de *caches*. Desta forma, a estratégia de *caching* não apresenta benefícios.

A partir dos resultados obtidos nesta dissertação percebe-se a existencia de várias frentes de trabalhos futuros. O modelo da rede de comunicação pode ser estendido para incluir árvores não balanceadas. O mapeamento real da distribuição dos usuários por áreas geográficas pode ser incluído. Este mapeamento influencia o modelo a ser escolhido para representar a rede de comunicação. Nas RCSD e RSCCF o estudo do impacto da sincronização dos servidores no custo total da rede ajudará o entendimento do projeto de redes reais. O estudo dos protocolos de estabelecimento das sessões DHT também é um cenário que exige maiores explorações.

---

## Apêndice

*“Para saber se a água de um balde está quente ou fria deve-se meter a mão no balde. De nada servirá a discussão por mais brilhante que possa ser.”*

Sabedoria zen

---

Este teorema foi originalmente demonstrado em [29] e encontra-se neste apêndice para conveniência do leitor.

**Teorema:** O custo mínimo de largura de banda de uma sessão de DHT, em uma rede onde o custo de largura de banda/capacidade dos canais obedece uma relação linear, é alcançado quando o servidor de controle está localizado em um nó com cinquenta por cento ou mais dos participantes da sessão abaixo dele e cujos descendentes têm, cada um deles, menos do que cinquenta por cento dos participantes abaixo de si.

**Prova:** Seja  $i$  um nó com cinquenta por cento ou mais dos participantes da sessão abaixo dele e cujos descendentes têm, individualmente, menos do que cinquenta por cento dos participantes da sessão abaixo de si. Seja  $C_i$  o custo de largura de banda da sessão DHT quando o servidor de controle está localizado no nó  $i$ . Precisa-se provar que o custo da sessão DHT quando o servidor de controle é colocado no  $j$ -ésimo nó,  $C_j$ , para  $i \neq j$ , é sempre maior que  $C_i$ .  $C_i$  e  $C_j$  mantêm a seguinte relação entre si:

$$C_j = C_i + l_d + l_n$$

em que:

$l_d$  - é a diferença entre o número de canais alocados pelos participantes da sessão de DHT, que são descendentes do nó  $i$ , quando o servidor de controle está localizado no nó  $j$  e o número de canais alocados quando o servidor de controle está localizado no nó  $i$ .

$l_n$  - é a diferença entre o número de canais alocados pelos participantes da sessão de DHT que não são descendentes do nó  $i$  quando o servidor de controle está localizado no nó  $j$  e o número de canais alocados quando o servidor de controle está localizado no nó  $i$ .

Assim, é necessário mostrar que  $C_j$  é sempre maior que  $C_i$ . Em outras palavras, é necessário provar que  $l_d + l_n > 0$ . Os seguintes casos devem ser considerados nesta prova: i) o nó  $j$  é um ancestral do nó  $i$ , ii) o nó  $j$  é um descendente do nó  $i$ , e iii) o nó  $j$  não é nem descendente nem ancestral do nó  $i$ .

i) O nó  $j$  é um ancestral do nó  $i$

Se o nó  $i$  não é filho do nó  $j$ , tem-se:

$$l_d = d_{ij} \times p_i$$

$$l_n = -d_{ij} \times (P - p_j) + \sum_{k=0}^{d_{ij}-1} (d_{ij}-k) \times p_k$$

em que:

$d_{ij}$  - é o número de canais que conectam o nó  $i$  ao nó  $j$  (diferença de altura)

$p_i$  - é o número de participantes que são descendentes do nó  $i$

$p_j$  - número de participantes que são descendentes do nó  $j$

$P$  - número de participantes da sessão de DHT

$K = \{\text{conjunto ordenado de nós do caminho que conecta o nó } j \text{ ao pai do nó } i, \text{ começando do nó } j\}$

$p_k$  - número de participantes da sessão DHT que são descendentes do nó  $k \in K$  e que não possuem nenhum outro ancestral  $\tilde{k}$ , tal que  $\tilde{k} > K$  e  $\tilde{k} \in K$ .

O valor mínimo de  $l_n$ ,  $\tilde{l}_n$ , é alcançado quando todos os não-descendentes do nó  $i$  estão concentrados abaixo dos irmãos do nó  $i$ .  $\tilde{l}_n$  é dado por:

$$\tilde{l}_n = -d_{ij} \times (P - p_j) - d_{ij} \times (p_j - p_i)$$

Assim, deve-se provar que  $\tilde{l}_n + l_d > 0 \Rightarrow l_n + l_d > 0$ .

Sabe-se que:

$$\tilde{l}_n = d_{ij} \times (p_i - P)$$

$$\tilde{l}_n + l_d = 2d_{ij} \times p_i - d_{ij} \times P$$

Por definição, sabe-se que  $p_i \geq 0,5P$ . Assim,

$$\tilde{l}_n + l_d > 0 \Rightarrow l_n + l_d > 0 \Rightarrow C_j > C_i$$

Se o nó  $i$  for filho do nó  $j$ , tem-se:

$$l_d = p_i$$

$$l_n = -(P - p_i)$$

$$l_n + l_d = 2p_i - P$$

Por definição  $2p_i \geq P \Rightarrow l_n + l_d \geq 0 \Rightarrow C_j \geq C_i$

ii) O nó  $j$  é um descendente do nó  $i$

Se o nó  $j$  não for um filho do nó  $i$ :

$$l_n = (P - p_i) \times d_{ij}$$

$$l_d = -d_{ij} \times p_j + \sum_{k=0}^{d_{ij}-1} (d_{ij} - 2k) \times p_k$$

em que:

$K = \{\text{conjunto ordenado de nós do caminho que conecta o nó } i \text{ ao pai do nó } j, \text{ começando do nó } i\}$

$p_k$  - número de participantes da sessão de DHT que são descendentes do nó  $k \in K$  e que não possuem

nenhum outro ancestral  $\tilde{k}$ , tal que  $\tilde{k} > K$  e  $\tilde{k} \in K$ .

$\tilde{l}_d$ , valor mínimo de  $l_d$ , é obtido quando os não-descendentes do nó  $w$  (filho do nó  $i$ ) estão todos concentrados abaixo dos irmãos do nó  $j$ . Neste caso, tem-se:

$$\tilde{l}_d = -d_{ij} \times p_j + d_{ij} \times \alpha P + (1 - d_{ij})(p_i - \alpha P - p_j)$$

em que:

$\alpha$  - é a fração do número total de participantes da sessão que são descendentes do nó  $i$  e não são descendentes de nenhum nó  $k \in K$ .

$$\tilde{l}_d = (2\alpha d_{ij} + d_{ij}) \times P - 2d_{ij} \times p_i + (p_i - \alpha P - p_j)$$

$p_i$  pode ser expresso como:

$$p_i = (\alpha + \beta) P$$

em que:

$\beta$  - é a fração do número total de participantes que são descendentes do nó  $i$  e cujos ancestrais, diferentemente do nó  $i$ , estão em  $K$ .

$$\tilde{l}_d = d_{ij} \times P - 2\beta \times d_{ij} \times P + (p_i - \alpha P - p_j) > 0$$

Por definição  $\beta < 0.5$ . Assim,

$$l_n + \bar{l}_d > l_n + l_d > 0 \Rightarrow C_j > C_i$$

Se o nó  $j$  é filho do nó  $i$ :

$$l_d = -p_j + (p_i - p_j)$$

$$l_n = P - p_i$$

$$l_n + l_d = P - 2p_j$$

Por definição:  $P > 2p_j$ . Assim:

$$l_n + l_d \geq 0 \Rightarrow C_j \geq C_i$$

Se  $j$  é filho de  $i$

$$l_d = -p_j + (p_i + p_j)$$

$$l_n = P - p_i$$

$$l_n + l_d = P - 2p_j > 0 \Rightarrow C_j > C_i$$

**iii) O nó  $j$  não é nem ancestral nem descendente do nó  $i$**

$$l_d = d_{ij} \times p_i$$

$$l_n = -d_{ij} \times p_j + \sum_H s_h \times p_h$$

em que:

$d_{ij}$  - é a distância (mínima) entre os nós  $i$  e  $j$ .

$p_h$  - é o número de participantes abaixo do *head end*  $h$  que não são descendentes nem do nó  $i$  e nem do nó  $j$ .

$s_h$  - é a diferença entre a demanda por canais, dos participantes abaixo do *head end*  $h$ , quando o servidor de controle está localizado no nó  $j$  e quando o servidor de controle está localizado no nó  $i$ .

$$l_n + l_d = -d_{ij} \times p_j + \sum_H s_h \times p_h + d_{ij} \times p_i$$

Sabe-se que  $\sum_H s_h \times p_h$  é minimizado, (i.e., maximiza a economia de canais) quando todos os participantes que não estão nem abaixo do nó  $i$  e nem abaixo do nó  $j$  estão concentrados abaixo dos irmãos do nó  $j$ . Assim, tem-se:

$$l_n + l_d = d_{ij} \times p_i - d_{ij} \times p_i + (2 - d_{ij}) \times (P - p_j - p_i)$$

$$l_n + l_d = 2d_{ij} \times p_i - d_{ij} \times P_i + 2(P - p_j - p_i)$$

Por definição  $2P_i > P$  e  $P - p_j - p_i > 0$ . Assim,

$$l_n + l_d \geq 0 \Rightarrow C_j \geq C_i$$

Notou-se que o teorema acima é válido também para árvores simétricas, i.e., árvores cujos canais de mesmo nível têm o mesmo custo.

---

## Referências Bibliográficas

*“Une chose m’exide maintenant après m’avoir ébloui:  
ce sont les citations et les références”*

(Uma coisa me exaspera agora depois de ter-me  
deslumbrado: são as citações e as referências)

Jean Grenier

- 
- [1] A. D. Gelman *et al.*, “A store-and-forward architecture for video-on-demand service”, *Proc. of IEEE ICC’91*, pág. 842-846.
- [2] A. L. Cherenak, “Tertiary storage: An evaluation of new applications”, Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley, dezembro 1994.
- [3] A. Merchant, Q. Ren e B. Sengupta, “Hierarchical Storage Servers for Video on Demand: Feasibility, Design and Sizing”, *IEEE ICC’96*, pág. 272-277.
- [4] A. Tanenbaum, “Computer Networks”, Prentice Hall International, 1996
- [5] B. Furht, D. Kalra, F. L. Kitson, A. A. Rodriguez e W. E. Wall, “Design Issues for Interactive Television Systems”, *IEEE Computer*, pág. 25-38, maio 1995.
- [6] B. Khasnabish, “Broadband to the Home (BTTH): Architectures, Access Methods, and the Appetite for It”, *IEEE Network*, pág. 58-69, janeiro/fevereiro 1997.
- [7] B. T. Olsen *et al.*, “Techno-Economic Evaluation of Narrowband and Broadband Access Network Alternatives and Evolution Scenario Assessment”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 6, pág. 1184-1202, agosto 1996.
- [8] C. Bisdikian, K. Maruyama, D. Seidman e D. Serpanos, “Cable Access Beyond the Hype: On Residential Broadband Data Services over HFC Networks”, *IEEE Communications Magazine*, pág. 128-135, novembro 1996.

- [9] C. C. Bisdikian e B. V. Patel, "Issues on Movie Allocation in Distributed Video-on-Demand Systems", *Proc. ICC*, 1995
- [10] C. Papadimitriou, S. Ramanathan, P. V. Ragan e R. SampathkKumar, "Multimedia information caching for personalized video-on-demand", *Computer Communication*, vol. 18, no. 3, pág. 204-216.
- [11] D. Deloddere, W. Verbiest e H. Verhille, "Interactive video on demand", *IEEE Communications Magazine*, pág. 155-162, maio 1994.
- [12] D. J. Gemmel, H. M. Vin, D. D. Kandlur, P. V. Rangan e L. A. Rowe, "Multimedia Storage Servers: A Tutorial", *IEEE Computer*, pág. 40-49, maio 1995.
- [13] E. Perry e S. Ramanathan, "Network Management for Residential Broadband Interactive Data Services", *IEEE Communications Magazine*, pág. 114-121, novembro 1996.
- [14] E. R. Madeira e N. L. S. Fonseca, "Software Architecture for Multimedia Communications and Management in Multimedia Communications Networks", *Tatipamula and Bhumip (Ed)*, Artech House, 1997.
- [15] H. M. Vin e P. V. Rangan, "Designing a Multiuser HDTV Storage Server", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 11, no. 1, janeiro 1993.
- [16] J. A. Schnepf, D. H. C. Du, E. R. Ritenour e A. J. Fahrman, "Building Future: Medical education environments over ATM networks", *Communiucations of the ACM*, vol. 38, no. 2, pág. 54-69, fevereiro 1995.
- [17] J. C. L. Liu, J. Hsieh, D. H. Du, M. Lin, "Performance of A Storage System for Supporting Different Video Types and Qualities", *Proc. of IEEE Infocom'96*, pág. 2-9.
- [18] J. E. Cabral Jr. e Y. Kim, "Multimedia Systems for Telemedicine and Their Communictions Requirements", *IEEE Communications Magazine*, pág. 20-27, julho 1996.
- [19] J. M. McManus e K. W. Ross, "Video-on-Demand Over ATM: Constant-Rate Transmission and Transport", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 6, pág. 1087-1098, agosto 1996.
- [20] J. P. Nussbaumer e F. Schaffa, "Impact of Channel Allocation Policies on Video on Demand Over CATV", *Private Communication*.
- [21] J. P. Nussbaumer e F. Schaffa, "On Bandwidth and storage trade-off in multimedia distribution networks", *Proc. of INFOCOM'95*, pág. 1020-1026, 1995.
- [22] J. P. Nussbaumer, B. V. Patel, F. Schaffa e J. P. G. Sterbenz, "Networking requirements for interactive video on demand", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 13, n. 5, Pág. 779-787, junho 1995.
- [23] J. Rosenberg, R. E. Kraut, L. Gomez e C. A. Buzzard, "Multimedia Communications For Users", *IEEE Communications Magazine*, pág. 20-36, maio 1992.
- [24] J. Vandenameele, G. V. der Plas, C. Sierens, O. Nielsen e S. Graugaard-Jensen, "How to upgrade CATV networks to provide interactive ATM-based services", *Proc. of Globecom'95*, pág. 183-187, 1995.
- [25] K. C. Almeroth e M. H. Ammar, "The Use of Multicast Delivery to Provide a Scalable and Interactive Video-on-Demand Service", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 6, pág. 1110-1122, agosto 1996.
- [26] K. S. Jacobsen e J.M. Cioffi, "High Performance Multimedia Transmisson on the Cable Television Network", *Proc. ICC'94*, 1994.
- [27] L. Aarthun Ims, D. Myhre e B. Torre Olsen, "Economics of Residential Broadband Access Network Tech-

- nologies and Strategies”, *IEEE Network*, pág. 51-57, janeiro/fevereiro 1997.
- [28] L. F. Soares, “Redes de Computadores, das LANs, MANs, WANs às redes ATM”, Ed. Campus, 1995.
- [29] N. L. S. Fonseca, C. M. R. Franco e F. Schaffa, “Network Design for the Provision of Distributed Home Theatre Services”, a ser publicado em *Proc. of IEEE ICC'97*.
- [30] R. Rooholamini e V. Cherkassky, “System Interconnection Architectures for Multimedia Server”, *IEEE ICC'95*, pág. 238-242.
- [31] R. Steinmetz, “Multimedia file systems survey: approaches for continuous media disk scheduling”, *IEEE Computer Communications*, vol. 18, no. 3, pág. 133-144, março 1995.
- [32] *Statistical Abstract of United States*, U. S. Bureau of the Census, 113 edição, 1993.
- [33] T. D. C. Little, D. Venkatesh, “Popularity-based assignment of movies to storage devices in a video-on-demand system”, *Multimedia Systems*, pág. 280-287, 1995.
- [34] T. D. C. Little e D. Venkatesh, “Prospects for interactive video-on-demand”, *IEEE Multimedia*, pág. 14-24, 1994.
- [35] V. O. K. Li, W. Liao, Xiaoxin Qiu e E. W. M. Wong, “Performance Model of Interactive Video-on-Demand Systems”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 6, pág. 1099-1109, agosto 1996.
- [36] W. D. Sincoskie, “System architecture for a large scale video on demand service”, *Computer Networks and ISDN Systems*, vol. 22, pág. 155-162, 1991.
- [37] W. J. Liao e V. O. K. Li, “Synchronization of distributed multimedia systems with users interactions”, Communication Science Institute, Univesity of Southern California, Report CSI-95-05-01, maio 1995, submitted for publication.
- [38] Y. B. Lee e P. C. Wong, “A Server Array Approach for Video-on-Demand Service on Local Area Networks”, *Proc. of IEEE Infocom'96*, pág. 27-32.
- [39] Y. H. Chang, D. Coggins, D. Pitt, D. Skellern, M. Thapar e C. Venkatraman, “An Open-Systems Approach to Video on Demand”, *IEEE Communications Magazine*, pág. 68-80, maio.
- [40] Y. S. Chen, “Mathematical modeling of empirical laws in computer application: a case study”, *Comp. Math. Applicat.*, pág. 77-87, outubro 1992.