

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Felipe Uderman

**Otimização da alocação da capacidade de
armazenamento em redes de distribuição de
conteúdos**

NITERÓI

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Felipe Uderman

**Otimização da alocação da capacidade de
armazenamento em redes de distribuição de
conteúdos**

Dissertação de **Mestrado** *submetida* ao “Programa de Pós-Graduação em Computação” da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Redes e Sistemas Distribuídos e Paralelos.

Orientador:

Prof. Célio V. N. Albuquerque, Ph.D.

NITERÓI

2012

Otimização da Alocação da Capacidade de Armazenamento em Redes de
Distribuição de Conteúdos

Felipe Uderman

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Redes e Sistemas Distribuídos e Paralelos.

Aprovada por:

Prof. Célio V. N. Albuquerque, Ph.D. / UFF (Orientador)

Prof. Luiz Satoru Ochi, D.Sc. / UFF

Prof. Tiago Araújo Neves, D.Sc. / UFF

Prof. Marcelo Gonçalves Rubinstein, D.Sc. / UERJ

Niterói, 17 de dezembro de 2012.

Nunca é uma palavra muito grande, até mesmo para mim.
(Fangorn)

Dedico esta dissertação a todos da comunidade científica que venham a se interessar
pela mesma.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais Sergio Uderman e Conceição Uderman por terem investido em minha educação, à minha esposa Suzana M. Uderman pelo apoio concedido nas fases mais críticas desta jornada, aos colegas de trabalho da Petrobras por terem me incentivado a melhorar a minha formação, aos colegas do laboratório Mediacom (IC-UFF) por conta de suas colaborações a este trabalho e ao meu orientador Célio Albuquerque pela dedicação à pesquisa e seus esforços em me guiar pelos caminhos que resultaram na conclusão deste trabalho.

Resumo

A Internet evoluiu para uma rede de computadores de abrangência global que dá suporte a diversos serviços distribuídos. Alguns destes serviços, como a distribuição de vídeos em alta resolução, demandam recursos de rede que podem não estar disponíveis nativamente na Internet. Desta forma, soluções alternativas devem ser implementadas para que determinados serviços possam oferecer para seus usuários os níveis de Qualidade de Serviço (QoS) exigidos. Uma destas soluções alternativas consiste em posicionar servidores em locais estratégicos para que a distância entre o conteúdo e o usuário seja reduzida, o que introduz diversos efeitos benéficos ao serviço. Dentro deste contexto, as Redes de Distribuição de Conteúdos (RDCs) são compostas por servidores posicionados em locais estratégicos que colaboram para atender requisições de conteúdos dos usuários [27]. Além de posicionar servidores próximos aos usuários, as RDCs implementam algoritmos de replicação e distribuição de requisições que possuem o objetivo de otimizar o atendimento aos usuários e de reduzir seus custos de operação. Dentre os problemas de otimização aplicáveis às RDCs, o Problema da Alocação da Capacidade de Armazenamento (PACA) consiste em determinar de forma ótima qual parcela da capacidade total de armazenamento disponível deve ser alocado em cada ponto de distribuição existente [33]. Esta dissertação apresenta a implementação de uma solução para o PACA sob a forma de um Problema de Programação Linear (PPL) adequada para RDCs sem uma topologia hierárquica definida. Os resultados de simulação demonstram que uma alocação otimizada da capacidade de armazenamento nos servidores da RDC podem reduzir os custos associados à entrega de conteúdo, e que o ganho obtido neste processo depende da estratégia empregada para mapear as características dinâmicas da RDC e das particularidades dos cenários analisados.

Abstract

The Internet has evolved into a giant computer network that supports several services in order to serve millions of users worldwide. Some of these services, such as the distribution of videos in high resolution, demand networking features that may not be available natively on the Internet. Therefore, alternative solutions must be implemented to allow certain services to offer to their users the levels of quality of service required. One of these alternatives consists on positioning servers at strategic locations so that the distance between the content and the user is reduced, which introduces several benefits to the service. Within this context, the Content Distribution Networks (CND) are composed of servers placed in strategic locations to collaborate to meet requests of content users [27]. Besides placing servers close to users, the CDNs implement algorithms for replication and distribution of content that aims to optimize the quality of service perceived by the users and reduce their operating costs. Among the optimization problems suited for CDNs, the Storage Capacity Allocation Problem (SCAP) aims to determine optimally which portion of the total storage capacity available should be allocated to each distribution point exists [33]. This work presents the implementation of a solution to the SCAP in the form of a linear programming problem suitable for RDCs without a defined hierarchical topology. The simulation results show that an optimized storage capacity allocation can reduce the costs associated with content delivery, and that the gain obtained on this process depends on the strategy used to map the dynamic characteristics of the CDN and particularities of the scenarios analyzed.

Palavras-chave

1. Redes de Distribuição de Conteúdos.
2. Otimização.
3. Alocação do espaço de armazenamento.

Abreviações

RDC	:	Redes de Distribuição de Conteúdos
PACA	:	Problema da Alocação da Capacidade de Armazenamento
PDR	:	Problema de Distribuição das Requisições
PPL	:	Problema de Programação Linear
PPR	:	Problema do Posicionamento das Réplicas
PPRDR	:	Problema do Posicionamento das Réplicas e Distribuição das Requisições
PPS	:	Problema do Posicionamento dos Servidores

Sumário

Lista de Figuras	xi
1 Introdução	1
1.1 Objetivos do trabalho	4
1.2 Organização do texto	5
2 Redes de distribuição de conteúdos (RDCs)	6
2.1 Visão geral sobre as RDCs	7
2.2 Evolução das RDCs	10
2.3 Desafios das RDCs	13
2.4 Arquiteturas existentes para RDCs	14
2.4.1 RDCs comerciais	14
2.4.2 RDCs acadêmicas	15
2.5 Problemas de otimização aplicáveis às RDCs	16
3 Propostas de otimização de capacidade de armazenamento em RDCs	19
3.1 Trabalhos relacionados	21
3.2 Formulações matemáticas para o PACA	23
3.2.1 PACA para topologias de RDC hierárquicas	24
3.2.2 Formulação matemática proposta	27
4 Cenários de teste e análise dos resultados	29
4.1 Modelo de operação de RDCs utilizado	30

4.2	Cenários de teste	33
4.3	Resultados	35
4.3.1	Instâncias sintéticas: Ausência de restrições de banda de transmissão nos servidores e maior concentração da origem das requisições	37
4.3.2	Instâncias classe C: menor restrição de banda de transmissão nos servidores	38
4.3.3	Instâncias classe D: maior restrição de banda de transmissão nos servidores	43
5	Conclusões e trabalhos futuros	47
	Referências	54

Lista de Figuras

2.1	Modelo básico de uma RDC [27].	8
2.2	Exemplos de conteúdos disponibilizados em RDCs [27].	10
2.3	Evolução das RDCs [27].	12
4.1	Custos para as Instâncias Sintéticas.	37
4.2	Custos de replicação para as instâncias da classe C.	39
4.3	Custos de atendimento para as instâncias da classe C.	41
4.4	Custos totais para as instâncias da classe C.	43
4.5	Custos de replicação para as instâncias da classe D.	44
4.6	Custos de atendimento para as instâncias da classe D.	45
4.7	Custos totais para as instâncias da classe D.	46

Capítulo 1

Introdução

Atualmente, a Internet hospeda um grande número de serviços que são acessados por usuários em todo o mundo. Estes serviços, por muitas vezes, se baseiam na entrega de conteúdos para usuários com localização distribuída e que possuem demandas e recursos de telecomunicações distintos. Com o aumento da popularidade de serviços que exigem a transferência de grandes quantidades de dados, como por exemplo a disponibilização de conteúdos multimídia, como vídeos em alta resolução, as exigências por recursos de rede na Internet tendem a ser cada vez mais severas. Apesar da existência de circuitos de alta velocidade compondo o *backbone* da Internet, por muitas vezes a disponibilidade de recursos em sua borda, é limitada. De fato, quanto mais próximo dos usuários finais, menor tende a ser a disponibilidade de recursos de rede devido à alta capilaridade encontrada [22]. Além disso, fatores físicos como a distância entre réplicas de conteúdos e seus usuários por si só já podem ser suficientes para inviabilizar a implantação de determinados serviços. Ainda que este não seja o caso, o transporte de grandes quantidades de dados por longas distâncias na Internet tende a ter um custo elevado, além de contribuir para o congestionamento dos enlaces da Internet e degradação do seu desempenho como um todo. Um outro ponto importante é que falhas nos circuitos e equipamentos de rede no caminho entre o conteúdo e os usuários podem interromper o serviço momentaneamente, sendo este um motivo para aumentar a disponibilidade dos conteúdos em locais próximos aos usuários.

Desta forma, para os serviços que dependem da transferência de grandes quantidades de dados para seus usuários, é importante a implantação de soluções alternativas que possam mitigar as características indesejáveis da Internet atual. Estas soluções devem implementar métodos para aumentar a disponibilidade de conteúdos para os usuários, diminuir a distância entre o conteúdo e seus usuários e até mesmo aumentar a velocidade e qualidade das transmissões realizadas. Por exemplo, a implantação de servidores

cache em determinados pontos da rede para armazenar conteúdos previamente solicitados para que novas solicitações não precisem buscar tal conteúdo em seu ponto de origem é uma estratégia popular entre os provedores de Internet e redes corporativas. Entretanto, como não existe uma estratégia de colaboração entre os servidores *cache* com o objetivo de otimizar este processo, os ganhos obtidos são limitados. Uma outra solução é implementar a distribuição de conteúdos através de redes *peer to peer* (P2P), na qual os próprios usuários são capazes de compartilhar conteúdos entre si [32]. Apesar da grande vantagem obtida com o aumento da disponibilidade de fontes capazes de fornecer conteúdos, o desempenho desta estratégia depende da quantidade e comportamento dos usuários conectados e da popularidade dos conteúdos solicitados, o que muitas vezes não é possível controlar. Dentro deste contexto, a necessidade de se distribuir conteúdos de forma confiável e com custos reduzidos na Internet motivou o desenvolvimento das Redes de Distribuição de Conteúdos (RDCs).

Uma Rede de Distribuição de Conteúdos (RDC) é uma rede sobreposta de servidores colaborativos nos quais réplicas de conteúdos são posicionadas e então distribuídas para os usuários [27]. Por conta do volume crescente do número de requisições por conteúdos na Internet, as RDCs se tornaram uma escolha popular entre os provedores de conteúdos que almejam atender com qualidade seus atuais e futuros usuários. Esta afirmação é válida especialmente para certos tipos de conteúdos multimídia, que possuem requisitos de Qualidade de Serviço (QoS) mais severos. Uma RDC é capaz de posicionar servidores, chamados de servidores *cache* ou servidores substitutos, próximos de seus usuários finais, e então replicar conteúdos neles para eles com o objetivo de reduzir os custos de entrega e replicação de conteúdos, além de melhorar a qualidade do atendimento percebida pelo usuário.

A arquitetura atual da Internet não pode garantir níveis adequados de QoS para os seus usuários, já que opera em um modelo de melhor esforço, o que significa que não há garantias de que as informações serão entregues em intervalos de tempo aceitáveis, ou até mesmo que não serão perdidas. Apesar de existirem protocolos que são capazes de prover garantias de QoS em redes TCP/IP, a implementação destes protocolos em escala global é uma tarefa extremamente desafiadora, devido principalmente à gerência distribuída da Internet e à sua ossificação [18]. Ainda assim, existe uma grande demanda por melhorias nos níveis de QoS na Internet que motiva o desenvolvimento de soluções alternativas para atingir este objetivo. Desta forma, o propósito principal de uma RDC é mitigar as deficiências e características indesejáveis da Internet atual, para entregar conteúdos aos clientes com níveis aceitáveis de QoS. Para cumprir esta tarefa e ainda obter lucros, os

provedores de RDC devem aplicar técnicas de otimização em diversos níveis para reduzir os seus custos de implementação e operação.

Uma importante etapa do dimensionamento de uma RDC é determinar a capacidade de armazenamento de seus servidores. O emprego de uma capacidade de armazenamento superdimensionada nos servidores de uma RDC irá contribuir para uma melhoria de performance na RDC, já que os servidores estarão aptos a armazenar mais conteúdos e aumentar as chances de atender as requisições dos clientes a partir de servidores próximos. Entretanto, um superdimensionamento da capacidade de armazenamento dos servidores obviamente não é desejável, já que existem custos associados a este aumento da capacidade de armazenamento e é possível que em grande parte do tempo esta capacidade de armazenamento extra esteja ociosa [29]. Por outro lado, uma capacidade de armazenamento subdimensionada provavelmente irá causar outros problemas de desempenho em RDCs, já que nestas condições os servidores da RDC não seriam capazes de armazenar uma quantidade de réplicas de conteúdos suficiente para aumentar o percentual de solicitações por conteúdos que são atendidos por servidores locais ou próximos dos clientes. Caso um conteúdo solicitado por um usuário não esteja presente em um servidor próximo, o usuário terá que aguardar até que a RDC direcione a sua solicitação para um outro servidor, ou até que a RDC transfira uma réplica do conteúdo solicitado para este servidor próximo. Como os provedores de RDC possuem um orçamento limitado para montar a sua infraestrutura física, é de extrema importância o desenvolvimento de técnicas eficientes para auxiliá-los a dimensionar a capacidade de armazenamento de seus servidores, com o objetivo de atingir os níveis de QoS impostos por seus usuários remotamente distribuídos.

Dentro deste contexto, esta dissertação trata de métodos de otimização da alocação do espaço de armazenamento em RDCs. O Problema da Alocação da Capacidade de Armazenamento (PACA) em RDCs consiste em determinar de forma ótima qual a proporção do espaço total de armazenamento disponível deve ser alocada nos pontos de distribuição previamente definidos. O PACA foi modelado sob a forma de um Problema de Programação Linear (PPL), e diversas abordagens foram aplicadas na solução deste PPL. Estas diferentes abordagens dizem respeito basicamente à maneira pela qual os dados de entrada do PACA são computados. Como será detalhado no Capítulo 4, devido às características dinâmicas de operação das RDCs, os resultados da otimização da alocação da capacidade de armazenamento diferem conforme os dados de entrada são processados. Além disso, para avaliar a efetividade da solução do PACA, simulações acerca do desempenho da operação de um modelo de RDC foram realizadas. Desta forma, os resultados obtidos possuem uma maior significância prática, já que não se limitam a avaliar o de-

sempenho dos métodos de otimização da alocação do espaço de armazenamento de forma isolada.

É importante ressaltar que, apesar da proposta desta dissertação consistir em uma modelagem do PACA para RDCs sem topologia definida sob a forma de um PPL, um método heurístico para um outro problema relacionado é utilizado para verificar o desempenho da alocação otimizada do espaço de armazenamento. Este problema relacionado é o Problema do Posicionamento das Réplicas e Distribuição de Requisições (PPRDR), e mapeia os custos operacionais de um provedor de RDC ao transferir internamente réplicas de conteúdos entre os seus diversos servidores e ao entregar os conteúdos para usuários que os solicitam. Foi ainda implementado um método heurístico para resolver o PACA de forma *online* em conjunto com o PPRDR, que possui o objetivo de capturar de forma mais eficiente as características dinâmicas das RDCs. Estes conceitos referentes à proposta desta dissertação e metodologia de verificação de desempenho da proposta são apresentados de forma mais detalhada nos Capítulos 3 e 4.

Desta forma, destacam-se duas principais contribuições desta dissertação. A primeira consiste na modificação de uma formulação existente do PACA [14] para RDCs com uma infraestrutura hierárquica para resolver o PACA em cenários de RDCs sem topologia definida. Isto torna a formulação mais genéricas, já que com esta modificação é possível resolver o PACA para diversas topologias de RDC, inclusive hierárquicas. A segunda contribuição é a metodologia de avaliação empregada, que computa os custos de operação da RDC após a aplicação dos resultados obtidos para o PACA, através de diversas abordagens. Esta metodologia é inédita na literatura, e permite uma avaliação condizente com a realidade dos provedores de RDC, já que é através de melhorias nos custos operacionais que os resultados do PACA terão maior significância.

1.1 **Objetivos do trabalho**

O objetivo deste trabalho é avaliar a eficácia de metodologias de otimização da capacidade de armazenamento de uma RDC em reduzir os seus custos de operação, ou seja, em reduzir os custos de atendimento de requisições por conteúdos por parte dos usuários e os custos de replicação de conteúdos entre os servidores da RDC. Dadas as características dinâmicas inerentes à operação de uma RDC, não necessariamente uma otimização do espaço de armazenamento será benéfica para a RDC, já que as metodologias encontradas na literatura para otimização do espaço de armazenamento em RDCs não possuem os mesmos critérios

de custos que podem vir a ser aplicados para se avaliar o desempenho operacional da RDC. É também objetivo deste trabalho avaliar o desempenho de diferentes metodologias de aplicação de métodos de otimização da capacidade de armazenamento com relação ao ganho operacional obtido nas RDCs. Por fim, um outro objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho dos métodos de otimização do espaço de armazenamento em RDCs em diferentes cenários de topologia e recursos físicos das RDCs.

1.2 Organização do texto

O restante desta dissertação está organizada da seguinte forma: o Capítulo 2 contém informações teóricas sobre as RDCs, incluindo a sua evolução histórica seus principais componentes e mecanismos, assim como os principais problemas de otimização associados ao planejamento e operação das RDCs e descrições de RDCs que estão atualmente em operação na Internet. O Capítulo 3 descreve em detalhes o PACA, incluindo descrições de trabalhos anteriores disponíveis na literatura que se relacionam com o tema. O modelo de otimização da alocação da capacidade de armazenamento no qual foi baseado este trabalho é descrito, assim como a sua adaptação para o modelo de RDC que foi utilizado para obter os resultados de simulação apresentados. O Capítulo 4 descreve o modelo de operação de RDCs que foi utilizado para validar as otimizações da alocação da capacidade de armazenamento realizadas. Além da descrição deste modelo, são apresentadas as diferentes metodologias de aplicação dos resultados da otimização da alocação da capacidade de armazenamento, os diferentes cenários de topologias de RDC que foram simulados e os resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho, incluindo uma avaliação dos aspectos práticos de aplicação dos resultados obtidos e uma descrição de possíveis trabalhos futuros decorrentes dos resultados obtidos.

Capítulo 2

Redes de distribuição de conteúdos (RDCs)

O aumento crescente da popularidade dos serviços oferecidos através da Internet tende a impulsionar de forma significativa a demanda de conteúdos por parte dos usuários. Novos desafios estão associados a este aumento na demanda por conteúdos, já que serviços atualmente populares na Internet frequentemente experimentam problemas de congestionamento e conseqüente indisponibilidade. Estes momentos de indisponibilidade são geralmente associados à problemas do tipo *flash crowds* [6], que consistem em um aumento repentino e significativo da demanda de um determinado conteúdo. Eventos do tipo *flash crowds* não podem ser evitados, porém os seus efeitos devem ser tratados pela infraestrutura de distribuição de conteúdos para aumentar a Qualidade de Serviço experimentada pelos cada vez mais exigentes clientes destes conteúdos.

Apesar das melhorias observadas nas capacidades de transmissão dos enlaces que compõem a Internet, tanto nos acessos quanto no *backbone* e aumento da capacidade de armazenamento e processamento dos servidores, de forma geral a entrega de conteúdos aos usuários ainda é problemática no que diz respeito ao atraso experimentado pelos usuários que solicitam conteúdos [24]. Isto se deve em grande parte à ausência de um sistema de gerência global para a Internet, o que torna difícil a tarefa de prover níveis aceitáveis de qualidade de serviço neste ambiente. Além disso, o crescimento da demanda por conteúdos tende a superar os benefícios das melhorias físicas observadas na infraestrutura da Internet, o que evidencia a necessidade de mecanismos alternativos para garantir a entrega de conteúdos de forma satisfatória aos usuários.

Uma Rede de Distribuição de Conteúdos (RDC) pode ser definida como uma rede sobreposta de servidores colaborativos, que são utilizados para posicionar réplicas de conteúdos a serem acessados de forma transparente pelos clientes [27]. Devido ao cresci-

mento do número de requisições por conteúdos na Internet, as redes de distribuição de conteúdos estão cada vez mais sendo utilizadas pelos provedores de conteúdos. Esta afirmação é especialmente verdadeira para conteúdos multimídia, que normalmente possuem requisitos de qualidade de serviço mais restritos.

Uma RDC é capaz de posicionar os servidores de conteúdo mais próximos aos clientes, replicar conteúdos para estes servidores e atender às requisições dos clientes, indicando qual servidor deve ser utilizado. Estas funcionalidades produzem efeitos positivos no desempenho do serviço tanto sob o ponto de vista do usuário, que irá experimentar um menor atraso de rede, maior banda de transmissão disponível e maior disponibilidade do conteúdo, quanto sob o ponto de vista dos provedores de RDCs, que podem otimizar o atendimento das requisições, reduzindo seus custos operacionais e consequentemente aumentando a sua lucratividade.

2.1 Visão geral sobre as RDCs

Primeiramente, alguns conceitos relacionados às RDCs devem ser definidos, para melhorar a compreensão do restante do texto:

- **Entrega de conteúdos:** a ação de servir conteúdos aos clientes, a partir de suas requisições;
- **Conteúdo:** dados ou recursos digitalizados, divididos em duas partes principais: mídia codificada e metadados;
- **Mídia codificada:** dados estáticos, dinâmicos ou contínuos, como áudio, vídeo, imagens, documentos e páginas Web;
- **Provedor de RDC:** organização ou empresa que provê a infraestrutura necessária para entregar conteúdos a clientes de maneira satisfatória;
- **Provedor de conteúdos:** entidade que delega a um provedor de RDC a tarefa de entregar os seus conteúdos para os clientes;
- **Usuários finais:** são os usuários da RDC que acessam os conteúdos disponibilizados na RDC;
- **Servidores substitutos:** também chamados de *caches* ou servidores de borda, são distribuídos em diferentes localizações geográficas dentro da abrangência da

RDC e preenchidos com conteúdos que são entregues aos clientes, a partir de suas requisições;

Os provedores de RDC se beneficiam do fato de poderem ter como clientes diversos provedores de conteúdos, o que lhes permite montar uma infraestrutura robusta com ganho em escala, que pode ser compartilhada entre seus clientes. O objetivo principal das RDCs é entregar os conteúdos aos clientes, atendendo às restrições de qualidade de serviço impostas. Para cumprir este objetivo, as RDCs irão posicionar servidores de conteúdos próximos aos clientes e implementar mecanismos diversos de gerenciamento e operação. A figura 2.1 exemplifica um modelo básico de uma RDC, onde cada servidor substituto realiza a entrega de conteúdos para clientes geograficamente relacionados:

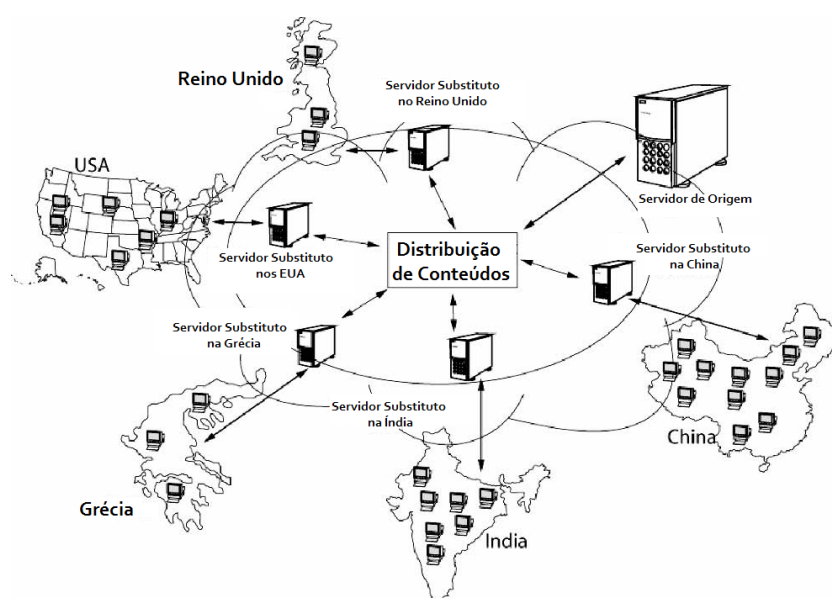


Figura 2.1: Modelo básico de uma RDC [27].

O servidor de origem é responsável por receber um conteúdo novo a partir de um provedor de conteúdos cliente da RDC e o registrar no sistema de gerência da RDC. Este processo permite que o conteúdo possa ser replicado para os demais servidores da RDC, e que requisições dos usuários por este conteúdo comecem a ser atendidos. Existe a possibilidade de que diversos servidores da RDC possam receber e registrar novos conteúdos na rede, o que tornaria este um mecanismo distribuído. De qualquer forma, existe a necessidade de que o sistema de gerência da RDC tenha conhecimento do novo conteúdo disponível.

Os servidores substitutos recebem réplicas dos conteúdos conforme metodologias pre-determinadas pelo esquema de replicação da RDC. Como existem limitações físicas de espaço de armazenamento nos servidores, em muitos casos os servidores substitutos não

são capazes de armazenar cópias de todos os conteúdos presentes na RDC. O esquema de replicação deve portanto ser eficiente para cumprir o objetivo de disponibilizar os conteúdos mais requisitados em servidores substitutos próximos dos pontos de origem destas requisições. Como nem sempre é possível realizar a entrega de conteúdos a partir dos servidores substitutos mais próximos dos usuários solicitantes, seja por conta da falta de uma réplica do conteúdo solicitado ou porque um servidor não possui recursos de memória, processamento ou banda de transmissão para realizar o atendimento, precisam existir dentro da RDC mecanismos eficientes para decidir qual servidor será responsável pelo atendimento de uma determinada requisição.

Desta forma, um provedor de RDC deve oferecer serviços tanto aos clientes da RDC, que buscam conteúdos diversos, quanto aos contratantes do provedor de RDC, representados pelos provedores de conteúdo. Os principais serviços oferecidos por um provedor de RDC são o de redirecionamento de requisições e o de distribuição de réplicas.

O serviço de redirecionamento de requisições tem o objetivo de escolher um servidor substituto adequado para realizar o atendimento de uma requisição. O requisito mínimo para escolha é que exista uma réplica do conteúdo presente no servidor a ser escolhido, porém outros fatores também devem ser analisados, como a capacidade do servidor em realizar a entrega de acordo com os níveis de qualidade de serviço determinados pelo atendimento, o que depende dos recursos físicos do servidor e da qualidade do caminho de rede a ser utilizado para entregar o conteúdo ao usuário solicitante.

O serviço de distribuição de réplicas é responsável por distribuir réplicas dos conteúdos presentes na RDC para os servidores substitutos que irão realizar as entregas. Além de propagar réplicas de novos conteúdos na RDC, este serviço deve, em casos em que existem limitações relevantes no espaço de armazenamento dos servidores, determinar quais réplicas de conteúdos devem ser removidas dos servidores para permitir que réplicas de outros conteúdos possam ser armazenadas. A decisão de replicar um conteúdo para um determinado servidor deve levar em conta a popularidade deste conteúdo entre os clientes próximos do servidor, além das condições de rede entre os enlaces que interconectam os diversos servidores da RDC.

Diversos tipos de conteúdos podem ser disponibilizados pelas RDCs, tais como conteúdos estáticos (páginas HTML, imagens, documentos), transmissão de mídia (áudio e vídeo em tempo real) e conteúdos diversos (transferência de arquivos, serviços de diretório), ilustrados na Figura 2.2. Como diferentes conteúdos possuem requisitos de qualidade distintos, é natural que as RDCs apliquem preços diferenciados para a entrega dos conteúdos, basea-

dos principalmente nos seguintes fatores:

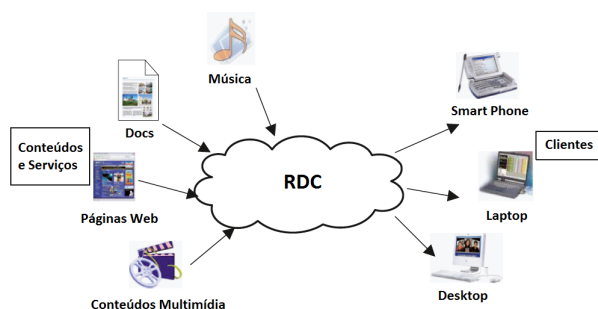


Figura 2.2: Exemplos de conteúdos disponibilizados em RDCs [27].

- Taxa de transmissão experimentadas pelos clientes. Quanto maior a taxa utilizada, maior o valor cobrado.
- Variação da distribuição de tráfego ao longo do tempo. Em períodos de maior congestionamento na rede, a entrega de conteúdos será mais custosa para os provedores de conteúdos.
- Tamanho dos conteúdos replicados entre os servidores originais e substitutos na rede.
- Número de servidores substitutos, que representam a habilidade da RDC em manter a qualidade do serviço oferecido em situações adversas.
- Confiabilidade, estabilidade e segurança da RDC.

2.2 Evolução das RDCs

A evolução das RDCs se deu a partir de outros tipos de tecnologias que, apesar de não possuírem os mesmos objetivos das RDCs, possuem características desejáveis para aumentar o desempenho de serviços de entrega de conteúdos. Algumas destas técnicas são:

- **Melhoria de *hardware* nos servidores de conteúdo:** Apesar destas melhorias aumentarem a capacidade dos servidores em prover conteúdos para os clientes, elas não são flexíveis e escaláveis o suficiente, já que pequenas melhorias nem sempre são possíveis, e eventualmente todo o sistema dos servidores teria que ser substituído para acomodar o crescente número de requisições.

- **Posicionamento de servidores do tipo *Proxy Caching* pelos Provedores de Serviço de Internet em locais próximos aos clientes:** Esta técnica melhora o desempenho da entrega de conteúdos para clientes com banda de acesso limitada, além de reduzir o tráfego total na Internet. Os *Proxy Caching* irão guardar uma cópia dos conteúdos previamente solicitados, para que novas requisições para estes mesmos conteúdos possam ser atendidas diretamente pelo *Proxy Caching*, sem necessidade de acionar o servidor original do conteúdo [6].
- **Posicionamento de diferentes níveis hierárquicos de servidores *Cache locais, regionais e internacionais*:** Esta técnica, conhecida como *Hierarchical Caching* [28], é capaz de prover um aumento adicional no desempenho da entrega de conteúdos, assim como na economia de banda. Além disto, a utilização de *Server Farms*, que consiste em múltiplos servidores que compartilham a responsabilidade de entregar o conteúdo requisitado, tem se mostrado uma solução mais escalável, além de prover uma redundância natural ao sistema.

Ainda que estas técnicas produzam bons resultados, elas são insuficientes para garantir a qualidade do serviço de entrega de conteúdos em situações adversas, já que atuam sem uma infraestrutura dedicada, dinâmica e colaborativa para a entrega dos conteúdos. As primeiras gerações de RDCs foram criadas para proteger a entrega de documentos Web de eventos do tipo *Flash Crowd*. Já a geração atual mudou o foco para entrega de vídeo sob demanda e transmissão de áudio e vídeo. É possível antecipar que a terceira geração de RDCs será voltada para a disseminação de conteúdos gerados por pessoas comuns, a chamada *Community-based CDNs*. A figura 2.3 ilustra este cenário.

As RDCs modernas evoluíram a partir de outros tipos de sistemas distribuídos para compartilhamento de recursos ou acesso a conteúdos digitais. Estes sistemas possuem características e mecanismos de operação relevantes para a composição das arquiteturas de RDC modernas. *Data Grids* são ambientes de computação intensiva que provêem serviços de processamento de grandes conjuntos de dados para usuários em diferentes localizações geográficas [9]. Existem duas funcionalidades dos *Data Grids* que são especialmente relevantes no contexto das RDCs: transferência confiável de dados e mecanismos de busca e replicação de objetos. Além disto, a segurança e a integridade dos dados são fatores relevantes para os *Data Grids*. Apesar disto, as RDCs se diferem dos *Data Grids* principalmente pelo fato do objetivo principal dos *Data Grids* ser fazer com que uma grande massa de dados seja transferida para um sítio de alta concentração de poder computacional para serem processados, enquanto que o objetivo principal das RDCs é fazer com

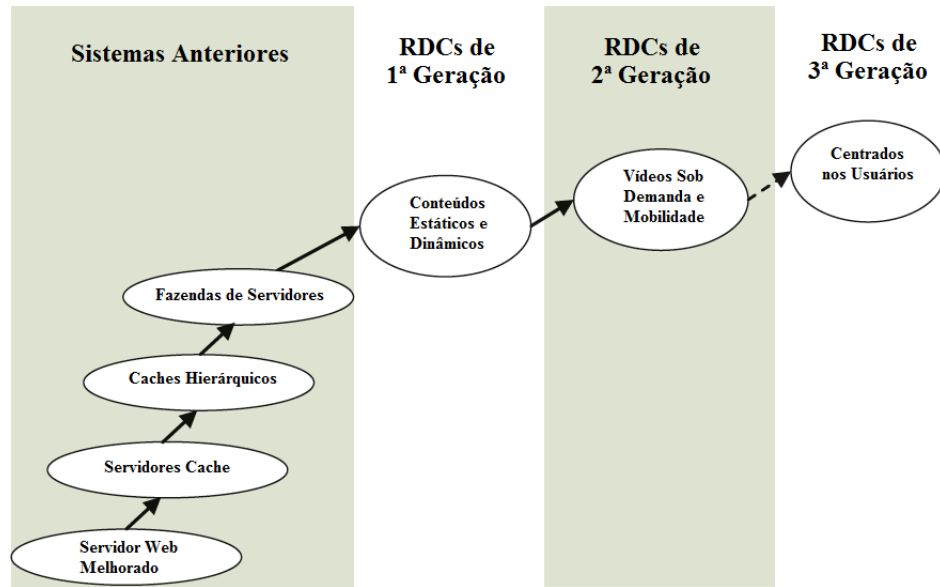


Figura 2.3: Evolução das RDCs [27].

que clientes geograficamente espalhados possam ter acesso a dados que originalmente se encontram em ambientes com alta capacidade de armazenamento.

Outros sistemas relacionados são os Bancos de Dados Distribuídos (BDD), que consistem em uma coleção de dados logicamente organizados em nós com diferentes localizações geográficas [23]. Neste tipo de sistema, cada nó pode agir como cliente, servidor ou ambos, a depender da situação. Os BDDs surgiram para suprir a necessidade de grandes corporações que desejavam substituir bancos de dados centralizados por um sistema distribuído capaz de integrar os bancos de dados existentes a novos bancos de dados, que surgem a partir de novas unidades corporativas. A principal diferença entre os BDDs e as RDCs é o fato de que os diversos sítios que compõem os BDDs possuem um grau de independência de operação e gerenciamento elevados, enquanto que nas RDCs os servidores que compõem o sistema têm sua operação regida por um sistema integrado. Além disto, as RDCs possuem o objetivo de entregar conteúdos aos seus clientes, enquanto que os BDDs fazem parte de sistemas de consulta e processamento de dados.

Por fim, as redes *Peer-to-Peer* (P2P), projetadas para o compartilhamento direto dos recursos computacionais dos clientes, sem o intermédio de uma entidade com uma infraestrutura dedicada, também possuem características compatíveis com as RDCs modernas [11]. Em redes P2P, cada cliente, ou *peer*, possui total autonomia para se juntar ou deixar a rede, e adicionar ou remover conteúdos em seu espaço de armazenamento.

As redes P2P são mais indicadas para o compartilhamento de conteúdos estáticos, já que características da sua arquitetura não conseguem acomodar de forma eficiente conteúdos dinâmicos. Isto se deve ao fato das redes P2P necessitarem que os conteúdos sejam armazenados por um grande número de usuários para manter níveis aceitáveis de QoS, o que seria problemático para o caso de conteúdos dinâmicos, já que as cópias armazenadas teriam que ser descartadas a cada modificação dos conteúdos. Estes sistemas possuem um alto grau de escalabilidade, e idealmente não possuem um ponto único de falha. Entretanto, em contraste com as RDCs, as redes P2P têm seu desempenho altamente afetados pelo número de clientes participantes na rede. Além disto, o principal objetivo das redes P2P é prover um mecanismo eficiente para busca e transferência de arquivos em meio aos clientes participantes, enquanto que as RDCs possuem o principal objetivo de atender às requisições dos clientes observando os seus requisitos de desempenho.

2.3 Desafios das RDCs

O principal objetivo das RDCs é atender provedores de conteúdos ou clientes que desejam ter seus requisitos de desempenho atendidos, em um ambiente escalável e confiável. Portanto, algumas regras de negócio devem nortear o desenvolvimento das arquiteturas de RDCs:

- **Escalabilidade:** A RDC precisa lidar com grandes volumes de dados e requisições por conteúdos, sem que os usuários e clientes experimentem uma queda de desempenho. É muito importante que uma RDC seja capaz de se adequar dinamicamente a variações abruptas na demanda por determinados conteúdos, alocando espaço de armazenamento quando houver necessidade, e conseqüentemente reduzindo os custos operacionais da RDC.
- **Confiabilidade, correspondência e desempenho:** Confiabilidade se refere a uma alta disponibilidade esperada para determinado serviço. Uma maneira de se prover confiabilidade a uma RDC é alocar diversos servidores, em diferentes regiões geográficas diferentes, para reduzir ao máximo as chances do cliente não ser atendido devido à indisponibilidade da RDC. Correspondência está relacionado com o tempo necessário para que a RDC consiga restabelecer o seu padrão original de qualidade no funcionamento, em caso de possíveis indisponibilidades do serviço ou redução da qualidade no atendimento. Por fim, o desempenho de uma RDC está altamente relacionado com a localização do conteúdo distribuído, mecanismos de roteamento

empregados e com as estratégias de replicação de dados e *caching* empregados.

2.4 Arquiteturas existentes para RDCs

Atualmente, diversas arquiteturas de RDC estão em operação, tanto no âmbito comercial quanto no acadêmico. Dentre as RDCs comerciais, algumas merecem destaque por estarem em operação estável há alguns anos: Akamai [1], EdgeStream [3], Limelight Networks [4] e Mirror Image [2].

2.4.1 RDCs comerciais

A Akamai [1] foi fundada em 1998 em Massachusetts, a partir de um esforço do MIT para resolver o problema de *flash crowd*. Atualmente, a Akamai é considerada a empresa líder no mercado de RDCs. A abordagem da Akamai é baseada na premissa de que prover conteúdos a partir de uma única fonte centralizada representa um grande problema de escalabilidade. Desta forma, seu sistema é projetado para atender às requisições por conteúdos a partir de diversos servidores substitutos na borda da rede. A Akamai distribui conteúdos estáticos (páginas HTML, arquivos e documentos), conteúdos dinâmicos (animações, scripts e DHTML), assim como transmissões de áudio e vídeo.

A Akamai implementa um mecanismo de alocação dinâmica de servidores para amenizar ocorrências de períodos de indisponibilidade causados por *flash crowds*. Através de um balanceamento de carga via DNS, a Akamai mapeia as requisições aos servidores com base no serviço requisitado, localização do usuário e condições da rede. Além disto, agentes que simulam o comportamento dos usuários finais são utilizados para realizar medições de qualidade que também alimentam o sistema de balanceamento de carga, protegendo servidores que se encontram congestionados. Outra técnica utilizada é a fragmentação de conteúdos, que são tratados como objetos independentes.

A Akamai utiliza um mecanismo proprietário de medição de qualidade nos enlaces entre os seus servidores para determinar as rotas menos custosas para transferir conteúdos entre os seus servidores [30]. Este processo diz respeito aos mecanismos de replicação de conteúdos da Akamai. De forma semelhante, medições de desempenho são realizadas entre pontos de presença de provedores de conteúdos clientes da Akamai e seus servidores, para que os melhores servidores disponíveis sejam escolhidos para receber novos conteúdos destes clientes. Para realizar a entrega de conteúdos aos seus usuários, a Akamai estabelece que um servidor próximo deste usuário será responsável por todas as entregas de conteúdos

necessárias.

A EdgeStream [3] foi fundada em 2000 na Califórnia como um provedor de transmissões de vídeo pela Internet. Provê serviços de vídeo sob demanda e transmissões IPTV para possibilitar o transporte de vídeos de alta qualidade pela Internet. Para atingir métricas de latência de rede, perda de pacotes e evitar caminhos congestionados, a EdgeStream desenvolveu técnicas de *Continuous Route Optimization Software* (CROS), *Internet Congestion Tunnel Through* (ICTT) e *Real Time Performance Monitoring Service* (RPMS).

A Limelight [4] Networks foi fundada em 2001 no Arizona. Seu foco é a distribuição de conteúdos via plataforma Web, incluindo vídeos, música, jogos e aplicativos. Além disto, também provê serviços de transmissão de áudio e vídeo. Empresas carregam seus conteúdos nos servidores da Limelight, que são distribuídos sob demanda, para seus diversos *clusters* de servidores espalhados pelo mundo. Também utiliza DNS para redirecionar as requisições dos clientes para servidores locais. Este sistema de redirecionamento é alimentado por mapas detalhados da topologia da Internet, construídos através de medições próprias e informações do protocolo BGP.

A Mirror Image [2] foi fundada em 1999 em Massachusetts como um provedor de conteúdo online, transmissões de áudio e vídeo e computação via Web. A sua arquitetura é baseada na alocação de grandes clusters de servidores Web, localizados em regiões geográficas densamente povoadas. A Mirror Image utiliza uma infraestrutura sobreposta à Internet denominada *Content Access Point* (CAP), para prover conteúdos aos seus usuários. Através de um balanceamento de carga via DNS, as requisições são enviadas para a localização CAP com o tempo de resposta mais rápido. Caso o conteúdo requisitado esteja presente na localização CAP escolhida, o atendimento é realizado. Caso contrário, o atendimento é realizado a partir do servidor de origem do conteúdo, e uma cópia é realizada para a localização CAP para futuras requisições.

2.4.2 RDCs acadêmicas

Em oposição às RDCs comerciais, o uso de tecnologias P2P é muito comum nas RDCs acadêmicas. Desta forma, as requisições são atendidas de forma distribuída por todos os participantes da rede. Estas RDCs baseadas em tecnologias P2P são eficientes apenas para conteúdos estáticos, sendo incapazes de lidar com conteúdos que podem ser dinamicamente modificados. Alguns exemplos de RDCs acadêmicas são: CoDeeN, Coral e Globule.

CoDeeN [34] é um sistema de servidores proxy baseado em P2P, implementada sob a rede PlanetLab que possibilita aos seus usuários um desempenho melhor ao acessar a maioria das páginas Web da Internet. O princípio de funcionamento do CoDeeN consiste em configurar os navegadores Web dos usuários participantes para utilizarem um dos caches do CoDeeN como proxy. Para cada requisição dos clientes, o servidor proxy selecionado irá tentar entregar o conteúdo solicitado. Caso ocorra a falta deste conteúdo no cache, os algoritmos de redirecionamento implementados pelo CoDeeN irão decidir para qual cache esta requisição deve ser enviada. Os algoritmos de redirecionamento levam em consideração a localização da requisição, a carga e confiabilidade do sistema e informações de proximidade. Caso a requisição não possa ser atendida por nenhum dos servidores cache do CoDeeN, a requisição é redirecionada para o servidor de origem.

Coral [12] é uma RDC gratuita, baseada em tecnologia P2P e implementada sob a rede PlanetLab. Seu objetivo é prover à maioria dos seus usuários um desempenho melhor ao acessar páginas Web participantes. Coral utiliza a banda de transmissão de voluntários para evitar eventos do tipo flash crowd e reduzir a carga nos servidores originais dos Web sites participantes. As requisições dos clientes são redirecionadas para servidores caches do Coral próximos de forma transparente, através de redirecionamento via DNS. Sempre que possível, dados são transmitidos entre servidores cache adjacentes, para reduzir tanto a carga no servidor Web original quanto a latência de rede experimentada pelos clientes.

Globule [25] é uma RDC colaborativa com implementação em código aberto. Seu objetivo é permitir que provedores de conteúdo Web possam se organizar e operar sua própria plataforma de armazenamento de escala global. Os usuários participantes constituem nós da rede Globule e oferecem recursos de armazenamento, banda de transmissão e poder de processamento. Globule provê mecanismos de replicação de conteúdos, monitoramento de servidores e redirecionamento de requisições para as réplicas próximas disponíveis.

2.5 Problemas de otimização aplicáveis às RDCs

Os processos de planejamento e operação das RDCs devem sempre que possível empregar técnicas de otimização com o objetivo de minimizar seus custos e ainda assim atender seus clientes de forma satisfatória. Os custos envolvidos com a implantação de uma RDC podem ser bastante expressivos, e existe a necessidade de atender requisitos de qualidade de serviço previamente acordados.

Uma RDC deve posicionar servidores próximos dos seus usuários, posicionar réplicas

de conteúdos neles e entregar estes conteúdos para os usuários. Desta forma, três problemas de otimização fundamentais tratam deste processo: o Problema do Posicionamento dos Servidores (PPS), o Problema do Posicionamento de Réplicas (PPR) e o Problema de Distribuição de Requisições (PDR).

Com relação ao conhecimento futuro das informações da RDC, um problema de otimização pode ser *online* ou *offline*. Em um problema de otimização *online* não existe nenhum conhecimento de informações futuras do problema a ser resolvido. Já em um problema de otimização *offline*, as informações de todos os períodos de tempo do problema a ser resolvido estão disponíveis. É importante ressaltar que apesar do conhecimento futuro representar uma vantagem para problemas de otimização *offline*, é improvável que em uma situação real seja possível obter dados precisos de períodos de tempo futuros. Desta forma, abordagens *offline* devem ser utilizadas para se obter os melhores resultados possíveis em termos teóricos e abordagens *online* devem ser utilizadas para se obter resultados com maior significância prática.

O PPS consiste em determinar de forma ótima o posicionamento dos servidores da RDC dada uma infraestrutura existente [15, 35, 16]. O posicionamento dos servidores deve ser realizado de forma a minimizar os custos de replicação de conteúdos e atendimento de requisições dentro da RDC. Desta forma, os servidores devem ser posicionados em localidades em que exista uma alta demanda por conteúdos, ou que apresenta altos custos de comunicação. O PPS pode ser considerado um problema *offline*, já que o posicionamento dos servidores é realizado em uma fase de planejamento da RDC.

O PPR deve determinar de forma ótima quais conteúdos devem estar presentes nos servidores da RDC. Com a existência de restrições de capacidade de armazenamento nos servidores da RDC, é necessário existir um mecanismo que gerencia a cópia e remoção de réplicas de conteúdos nos servidores. Este processo deve levar em conta que existe um custo associado a replicação de conteúdos dentro da RDC, e que réplicas dos conteúdos devem estar presentes nos pontos da RDC em que são mais solicitados, para que o custo de atendimento de requisições seja minimizado. Como a demanda por conteúdos possui características dinâmicas, preferencialmente o PPR deve ser resolvido de forma *online* para que seja possível replicar os conteúdos entre os servidores da RDC de acordo com a necessidade do momento.

O PDR tem o objetivo de associar de forma ótima as requisições dos usuários aos servidores da RDC responsáveis pela entrega do conteúdo solicitado. Esta decisão deve ser baseada na disponibilidade de conteúdos nos servidores, no custo de comunicação entre

estes servidores e o usuário solicitante, na disponibilidade de recursos físicos dos servidores e nos requisitos de QoS associados à requisição, caso existam. Devido à dependência do PDR a fatores dinâmicos que dificilmente podem ser mapeados de forma satisfatória em modelagens *offline*, o PDR deve ser abordado de forma *online*. Além dos custos associados à entrega do conteúdos, podem existir penalidades para atrasos na entrega e descumprimento dos requisitos de QoS estabelecidos, o que deve ser incorporado ao processo de otimização.

O PPR e PDR preferencialmente devem ser abordados de maneira integrada, pois existe uma alta dependência entre eles. O PDR depende dos resultados do PPR, pois um requisito básico para seleção de um servidor para atender a uma requisição é que exista neste servidor uma cópia do conteúdo solicitado. De forma análoga, o PPR deve ser resolvido com o objetivo de melhorar os resultados do PDR, ou seja, posicionar réplicas de conteúdos em servidores que possuem alta demanda por estes conteúdos. Desta forma, o Problema de Posicionamento de Réplicas e Distribuição de Requisições (PPRDR) trata da replicação de conteúdos e atendimento de requisições como um único problema, o que possibilita a obtenção de melhores resultados.

O Problema de Alocação da Capacidade de Armazenamento (PACA) é um problema de otimização relacionado com o PPS [33]. O PACA consiste em determinar de forma ótima a capacidade de armazenamento dos servidores da RDC, respeitando um orçamento predeterminado. O PACA é relevante em cenários em que existam conteúdos de tamanho relevante, em quantidade suficiente para esgotar a capacidade de armazenamento dos servidores da RDC. Conforme descrito no Capítulo 4, a capacidade de armazenamento dos servidores tem influência no PPRDR, alterando os custos de replicação de conteúdos e atendimento de requisições computados.

Dentro do contexto de uma RDC cujos servidores são implementados em máquinas virtuais que podem ter os seus recursos físicos, inclusive a sua capacidade de armazenamento, é possível formular abordagens *online* para o PACA. Em versões *online*, os resultados do PACA podem ser utilizados para ajustar a capacidade de armazenamento dos servidores para que seja possível posicionar nos servidores um número adequado de réplicas. Isto possibilita que abordagens integradas para o PACA e o PPRDR sejam formulados, o que é desejável devido à dependências destes problemas. Como descrito no Capítulo 3, nesta dissertação foi formulado um método heurístico que resolve estes dois problemas de forma integrada.

Capítulo 3

Propostas de otimização de capacidade de armazenamento em RDCs

O Problema da Alocação da Capacidade de Armazenamento (PACA) consiste em determinar de forma ótima a distribuição da capacidade total de armazenamento disponível entre os servidores da RDC. Os dados de entrada para o PACA devem descrever as características e limitações da RDC, como o espaço total de armazenamento disponível, o custo de comunicação entre cada elemento da RDC, assim como características da demanda dos clientes por conteúdos. Além disso, a topologia da RDC e o seu modelo de operação devem ser levados em consideração na modelagem do PACA, para que os resultados obtidos possam ser implementados dentro do contexto da RDC em questão. Por fim, informações sobre os clientes da RDC também são necessárias para determinar a popularidade relativa de cada conteúdo e a quantidade de requisições por conteúdos que cada cliente irá realizar ao longo dos períodos de tempo analisados.

Num cenário em que sítios clientes possuem densidades de usuários distintas e que o interesse destes usuários pelos conteúdos é heterogêneo, é importante que a capacidade de armazenamento seja alocada de forma adequada. Os resultados do PACA aumentam as chances da RDC ser capaz de realizar a entrega do conteúdo solicitado a partir de um servidor próximo do cliente, o que introduz diversos benefícios ao serviço, tais como um menor atraso de rede sob o ponto de vista do usuário final e uma menor carga nos enlaces da rede.

Apesar de existir uma tendência decrescente nos custos de armazenamento em servidores, o PACA pode se tornar um problema crítico em cenários futuros, por conta do rápido crescimento da demanda por conteúdos na Internet, especialmente por conteúdos multimídia [13]. Alguns tipos de conteúdos multimídia, como vídeos em alta resolução que estão ganhando popularidade na Internet, possuem um tamanho considerável quando

comparados a conteúdos tradicionais e por isto podem facilmente esgotar a capacidade de armazenamento de servidores de uma RDC. A baixa disponibilidade de enlaces de alta velocidade na última milha da Internet ainda é um entrave para serviços especializados na entrega de conteúdos multimídia em alta resolução. Entretanto, em cenários em que a maioria dos usuários finais tem acesso a enlaces de alta velocidade, o gargalo destes serviços será a disponibilidade dos conteúdos nos servidores. Como abordagens centralizadas possuem sérios problemas de escalabilidade e redes P2P possuem dificuldades em garantir níveis de QoS previamente acordados, a relevância do PACA ganha força no contexto do planejamento da infraestrutura de RDCs que tem o objetivo de dar suporte à entregas eficientes de conteúdos com altos requisitos de banda de transmissão e armazenamento na Internet. De fato, trabalhos recentes na área de otimização em RDCs consideram relevantes restrições de espaço nos servidores, devido ao grande tamanho e diversidade dos conteúdos [13, 8].

Atualmente, devido a características do mercado de RDCs, geralmente a alocação do espaço de armazenamento dos servidores é realizada sem uma análise mais aprofundada. Isto se deve em grande parte à baixa disponibilidade de opções de modelos, no que diz respeito a sua capacidade de armazenamento. Além disto, como o custo dos servidores não são diretamente proporcionais às suas capacidades de armazenamento, existe uma tendência dos clientes das RDCs escolherem servidores com maior capacidade de armazenamento para o seu atendimento, o que conduz a uma subutilização dos recursos disponíveis. Um outro efeito desta característica de mercado é que a capacidade de armazenamento total da RDC seja alocada de maneira quase que uniforme entre a RDC, o que vai de encontro à proposta de se otimizar os recursos da RDC, principalmente quando a demanda por conteúdos é heterogênea.

Uma possível solução para esta questão é a implementação dos servidores da RDC em máquinas virtuais que podem ter os seus recursos alocados dinamicamente [17]. Nesta configuração, além da possibilidade de uma alocação mais granular da capacidade de armazenamento dos servidores da RDC, a capacidade total disponível para o serviço de RDC pode ser realocada entre os servidores conforme as taxas de requisições por diferentes conteúdos é aumentada ou decrescida para os diferentes clientes e conteúdos da RDC [7]. Desta forma, supondo que os servidores da RDC implementados em máquinas virtuais compartilham recursos físicos com outros serviços, é possível evitar a subutilização deste recurso liberando o espaço de armazenamento que não precisa estar alocado para a RDC. De forma análoga, caso a demanda por conteúdos em um determinado servidor da RDC seja crescente, é possível aumentar o espaço de armazenamento deste servidor para que

mais cópias de conteúdos possam ser armazenadas, desde que existam recursos físicos disponíveis.

O restante deste capítulo apresenta trabalhos anteriores que são relacionados com esta dissertação e em seguida as formulações matemáticas propostos para o PACA. Primeiramente, o modelo proposto em [14] é detalhado. Este modelo foi modificado nesta dissertação. Na Seção 3.2.2 propomos generalizar o modelo para compatibilizá-lo com RDCs sem topologia definida, já que RDCs com esta característica foram utilizadas para verificar a capacidade do PACA em promover melhorias de desempenho para as RDCs em questão.

3.1 Trabalhos relacionados

Em [14], os autores apresentam o PACA para RDCs com topologias hierárquicas. Três formulações matemáticas são propostos para versões diferentes do PACA, assim como heurísticas gulosas que obtiveram resultados próximos do ótimo nas simulações realizadas. O primeiro modelo, adequado para RDCs com fortes relações hierárquicas entre seus servidores, é o mais simples já que não considera funcionalidades e restrições adicionais que poderiam melhorar a verossimilhança do modelo. Os modelos seguintes incluem restrições que limitam o número máximo de requisições por unidade de tempo que podem ser atendidas em cada servidor, além de permitir que as requisições possam ser redirecionadas para servidores em um mesmo nível hierárquico. O limite do número máximo de requisições por unidade de tempo em cada servidor aumenta o custo total da solução, mas faz com que o uso dos diferentes servidores seja mais uniforme. A funcionalidade que permite o redirecionamento de requisições para servidores do mesmo nível hierárquico reduz significativamente o custo total da solução, principalmente quando o custo de comunicação entre os servidores do mesmo nível hierárquico é baixo.

Em [15], os autores abordam o PPS como um problema de programação dinâmica, que tem o objetivo de determinar a localização ótima de servidores proxy Web enquanto minimiza o atraso percebido pelos usuário ao localizar e acessar conteúdos em uma CDN. Apesar do PPS ser capaz de resolver o problema da localização dos servidores substitutos de uma RDC, nada se pode concluir a respeito do dimensionamento destes servidores, o que representa um ponto fraco deste modelo. Além disso, os cenários apresentados supõem que todos os enlaces de comunicação possuem a mesma capacidade e que os conteúdos podem ser originados em apenas um servidor, características estas que não correspondem

a cenários realísticos.

Em [26], os autores propõem diversos algoritmos heurísticos para resolver o PPS e avaliam suas performance em topologias sintéticas e baseadas em redes reais derivadas de tabelas de roteamento BGP. Entre as heurísticas propostas, um algoritmo guloso que tenta determinar individualmente qual localização é mais adequada para posicionar um servidor cache em cada iteração alcançou os melhores resultados. Os autores também fazem considerações sobre questões práticas na obtenção dos dados de entrada necessários para resolver o PPS em cenários reais. Apesar da obtenção de dados precisos sobre a topologia de rede analisada ser relativamente simples, não é trivial obter outros parâmetros, como a performance dos enlaces de comunicação envolvidos e a quantidade de requisição por conteúdos por parte dos clientes, devido à sua natureza dinâmica. Entretanto, resultados de simulação mostram que os algoritmos propostos são pouco sensíveis a erros de estimativa destes parâmetros.

Em [16], os autores tratam do PPR no contexto de RDCs com topologia hierárquica. A solução ótima para o PPR formulado é obtida pela solução de um problema dinâmico. As simulações realizadas comparam o desempenho de diversos protocolos de posicionamento de réplicas em cenários com a capacidade total de armazenamento variável e com diferentes níveis hierárquicos. Os resultados sugerem que um dimensionamento adequado do total de espaço de armazenamento disponível é de grande importância para a performance do atendimento. Também é possível concluir que o número de níveis hierárquicos definidos para uma RDC não deve ser superior a quatro porque, apesar do aumento moderado da taxa de acerto do servidor em RDCs hierárquicas com mais níveis, existe um grande aumento no atraso médio observado pelos clientes devido à dificuldade de localizar conteúdos nos servidores. Além disso, simulações realizadas com diferentes distribuições que modelam a popularidade dos conteúdos dentro da RDC demonstram que cenários em que a demanda dos clientes é concentrada em menos conteúdos são vantajosas para a solução proposta.

Em [35], os autores também abordam o PLS, mas a solução apresentada é baseada em algoritmos genéticos. Uma solução numérica para a mesma topologia de redes analisada em [16] é apresentada, juntamente com uma comparação de performance entre o algoritmo genético proposto e o algoritmo guloso proposto em [26]. O algoritmo guloso foi escolhido para a avaliação de performance por ter obtido os melhores resultados quando comparado com os outros algoritmos propostos em [26] e o algoritmo de programação dinâmica proposto em [15]. Os resultados numéricos demonstram que, para um número

disponível de servidores maior do que dois, o algoritmo genético pode alcançar melhores resultados que o algoritmo guloso. Entretanto, como os resultados numéricos foram computados para apenas uma topologia de rede com custos de comunicação homogêneos, não é possível concluir que o algoritmo genético proposto terá uma boa performance para outros cenários. De fato, os autores mostram que o ganho de performance do algoritmo genético proposto pode variar significativamente quando diferentes definições de taxa de requisição são utilizadas.

A partir da análise destes trabalhos é possível concluir que os trabalhos que abordam a alocação do espaço de armazenamento em RDCs [14, 15, 35] não extrapolaram os seus resultados por meio da avaliação da performance de uma RDC que teve sua distribuição capacidade de armazenamento ou posicionamento dos servidores realizada de forma otimizada. De fato, estes trabalhos limitam o escopo de suas análises à performance das soluções propostas para o PACA ou PPS, através da análise da complexidade computacional das soluções exatas e desenvolvimento de métodos heurísticos eficientes para os problemas propostos. Desta forma, a análise do impacto das otimizações realizadas sobre a alocação do espaço de armazenamento em RDCs na performance de diferentes métodos de resolução do PPRDR, que lida com os mecanismos de operação, replicação de conteúdos e atendimento das requisições, pode trazer contribuições tanto para a comunidade científica quanto para os provedores de RDC.

3.2 Formulações matemáticas para o PACA

A modelagem do PACA deve contemplar características da topologia e operação da RDC que será avaliada. Para uma topologia hierárquica, por exemplo, em que somente um subconjunto dos servidores da RDC está disponível para atender determinadas requisições, é preciso considerar esta característica na modelagem do PACA. De forma semelhante, existem modelos de operação de RDCs que definem um servidor próximo ao cliente que sempre será responsável pela entrega de seus conteúdos, em contraste com RDCs que escolhem dinamicamente qualquer servidor capacitado para o atendimento, o que também deve ser considerado na modelagem do PACA.

Primeiramente, uma formulação matemática para o PACA para RDCs com topologias hierárquicas [14] é analisado. Este modelo foi adaptado para ser utilizado em redes não hierárquicas e gerar os resultados apresentados nesta dissertação, sendo portanto importante a sua compreensão. Por fim, na Seção 3.2.2, é apresentada a proposta desta

dissertação: uma formulação matemática que resolve o PACA para RDCs sem topologia definida.

3.2.1 PACA para topologias de RDC hierárquicas

Em [14], o PACA para RDCs hierárquicas e com conteúdos de tamanhos unitários foi definido da seguinte forma: Seja φ um conjunto de N conteúdos distintos de tamanho unitário; S o total de espaço de armazenamento disponível; J um conjunto de m clientes, cada um com uma taxa de requisição λ_j e uma distribuição de demanda por conteúdos $p_j : \varphi \rightarrow [0 : 1]$; uma árvore T com um conjunto V de n nós e uma função de distância $d_{j,v} : J \times V \rightarrow R^+$ associado com a j -ésima folha e o nó v . Dado que \mathbb{A} é o conjunto de todos os pares nós-objetos, o PACA consiste em determinar um conjunto $\mathcal{A} \subseteq \mathbb{A}$ com não mais que S elementos do tipo par de nós-objetos $(v, k), v \in V, k \in \varphi$. A escolha dos elementos de \mathcal{A} deve ser feita visando a minimização da seguinte expressão de custo:

$$\min_{\mathcal{A} \subseteq \mathbb{A}: |\mathcal{A}| \leq S} \sum_{j \in J} \lambda_j \sum_{k \in \varphi} p_j(k) \times d_j^{\min}(k) \quad (3.1)$$

, onde $d_j^{\min}(k) = \min(d_{j,os}, d_{j,v}) : v \in \text{ancestrais}(j), (v, k) \in \mathcal{A}$

onde $d_{j,os}$ é a distância entre o cliente j e o servidor de origem do conteúdo e $d_{j,v}$ é a distância entre o cliente j e o servidor v . Esta expressão tem o objetivo de minimizar a distância entre o cliente e o conteúdo a ser solicitado, principalmente quando a taxa de requisição deste cliente e a demanda pelo conteúdo em questão são altas.

A partir desta definição, os autores formularam uma modelagem matemática para o PACA sob a forma de um Problema de Programação Linear (PPL). Seja $X_{j,v}(k)$ uma variável binária que é igual a um se o cliente j recebe o objeto k a partir do servidor v , e igual a zero caso contrário. Seja $\delta_v(k)$ uma variável binária auxiliar que é igual a um se o objeto k é posicionado no servidor v , e igual a zero caso contrário. Estas duas variáveis se relacionam da seguinte forma:

$$X_{j,v}(k) = \begin{cases} 1 & , \text{ se o cliente } j \text{ recebe o} \\ & \text{conteúdo } k \text{ a partir do servi-} \\ & \text{dor } v \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\delta_v(k) = \begin{cases} 1 & , \text{ se } \sum_{j \in J} X_{j,v}(k) > 0 \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (3.3)$$

A equação 3.3 expressa o requerimento óbvio de que um conteúdo somente pode ser entregue para um cliente a partir de um determinado servidor se este servidor possuir este conteúdo armazenado. A partir das definições destas variáveis, o seguinte PPL inteiro foi formulado:

Max

$$z = \sum_{j \in J} \lambda_j \sum_{k \in \varphi} p_j(k) \sum_{v \in \text{ancestors}(j)} (d_{j,os} - d_{j,v}) X_{j,v}(k) \quad (3.4)$$

S.a.

$$\sum_{v \in \text{ancestors}(j)} X_{j,v}(k) \leq 1 \quad j \in J, k \in \varphi \quad (3.5)$$

$$\sum_{j \in \text{leaves}(v)} X_{j,v}(k) \leq U \cdot \delta_v(k) \quad v \in V, k \in \varphi, U \geq |J| \quad (3.6)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{k \in \varphi} \delta_v(k) \leq S \quad (3.7)$$

A maximização da equação 3.4 equivale à minimização da equação 3.1. A restrição 3.5 diz que apenas um servidor ancestral v de um determinado cliente j deve ser escolhido para a entrega do conteúdo k para este cliente. Esta restrição se faz necessária porque a formulação utilizada não permite que uma mesma requisição seja atendida por diferentes servidores, além de determinar que apenas servidores ancestrais dos clientes estão aptos a entregar conteúdos para eles. A restrição 3.6 diz que um conteúdo k somente pode ser entregue para um determinado cliente caso este conteúdo esteja presente no servidor v . Esta restrição relaciona as variáveis $X_{j,v}(k)$ e $\delta_v(k)$, fazendo com que $\delta_v(k)$ assumo o valor 1 quando o espaço de armazenamento de um conteúdo k for reservado no nó v para atender uma requisição de um cliente j , $\forall j \in J$. A restrição 3.7 diz que o total de capacidade de armazenamento alocado nos diversos servidores da RDC não pode ultrapassar a capacidade de armazenamento disponível.

Além de determinar a alocação da capacidade de armazenamento para cada servidor da RDC, esta modelagem do PACA também determina, de maneira estática, qual servidor

deve realizar o atendimento de cada requisição por conteúdos, e também qual conteúdo deve estar presente em cada servidor, que são parâmetros relacionados com o PDR e PPR, respectivamente. Entretanto, como abordagens dinâmicas para o PDR e PPR se mostraram bastante eficazes [21], estes resultados adicionais devem ser utilizados apenas para determinar a localização dos conteúdos no início da operação da RDC e o esquema inicial de distribuição de requisições, e mecanismos dinâmicos devem ser utilizados para resolver o PDR e PPR durante a operação da RDC.

Foi também proposta em [14] uma restrição adicional para implementar o conceito de balanceamento de carga entre os servidores da CDN. Seja W_v o número máximo de requisições que o servidor pode atender por período, a equação 3.8 deve ser adicionada ao PPL para incorporar o conceito de balanceamento de carga entre os servidores.

$$\sum_{j \in \text{leaves}(v)} \sum_{k \in \varphi} \lambda_j p_j(k) \leq W_v \quad v \in V \quad (3.8)$$

O PPL modificado para balancear a carga entre os servidores não pode ser resolvido devido à sua alta complexidade computacional [14]. Entretanto, resultados heurísticos demonstram que, ao considerar o balanceamento de carga entre os servidores, tanto a alocação da capacidade de armazenamento dos servidores quanto a efetiva utilização destes servidores para atender requisições se deu de forma mais uniforme. Apesar de uma distribuição de carga mais homogênea entre os servidores ser uma característica desejável em uma RDC, já que isto significa uma menor chance de subutilização dos recursos alocados nos servidores, o custo total desta solução foi maior do que o obtido pela heurística gulosa que não considera esta funcionalidade. Uma possível explicação para este aumento dos custos totais da solução é que ao se limitar o espaço de armazenamento dos servidores com base na sua capacidade de transmissão, solicitações futuras por conteúdos que poderiam já estar presentes em determinados servidores caso esta restrição não existisse terão que ser atendidas por outros servidores, o que tende a aumentar o custo do atendimento.

Os autores de [14] propuseram ainda uma outra modificação na formulação original que permite que servidores de um mesmo nível hierárquico possam encaminhar requisições uns para os outros, técnica conhecida como *request peering*. Esta modificação aumenta a complexidade da formulação, já que mais variáveis são necessárias para modelar a possibilidade de outros servidores, além dos servidores ancestrais de um determinado cliente, possam atender determinadas requisições. Através de um método heurístico que contempla este recursos, foi constatado que o custo total da solução pode ser reduzido em até

50% quando os custos de comunicação entre os servidores de um mesmo nível hierárquico é suficientemente baixo.

A partir deste resultado, é possível inferir que em redes sem topologia definida onde em teoria qualquer servidor da RDC está apto a atender qualquer requisição, independente da sua origem, ocorrerá uma redução ainda maior do custo total a solução, uma vez que ainda mais servidores poderão atender requisições quando necessário, ou seja, quando o servidor local ou aqueles mais próximos não possuem o conteúdo solicitado armazenado em disco, ou não possuem banda de transmissão disponível suficiente para atender à requisição respeitando os requisitos de QoS impostos.

3.2.2 Formulação matemática proposta

Como afirmado anteriormente, a formulação matemática do PACA deve levar em consideração o modelo de operação da RDC em questão. A formulação matemática para o PACA apresentada neste trabalho foi desenvolvida para topologias de redes sem hierarquia definida, onde todos os servidores da RDC podem interagir entre si, e qualquer servidor da RDC pode ser designado para atender uma determinada requisição de um usuário, podendo inclusive ocorrer o atendimento simultâneo de uma requisição por mais de um servidor. Os custos de comunicação entre os servidores da RDC são distintos e dinâmicos, o que significa que seus valores podem sofrer alterações ao longo dos períodos de tempo. Um outro ponto relevante é a existência de requisitos de QoS impostos pelos usuários ao solicitarem conteúdos e a aplicação de penalizações quando a RDC não é capaz de cumprir estes requisitos ao atender uma determinada requisição.

A formulação matemática do PACA proposta nesta dissertação foi realizada sob a forma de um PPL. Esta formulação é baseada na que foi apresentada em [14], com modificações necessárias para contemplar as características da topologia e modelo de operação das RDCs utilizadas. Além das modificações relacionadas com o modelo de operação de RDCs, são considerados conteúdos de tamanhos não unitários, o que aumenta a escalabilidade da solução, por conta do menor número de variáveis inteiras necessário para descrever o modelo. A modelagem matemática proposta para o PACA é definida como se segue:

Max

$$z = \sum_{j \in J} \lambda_j \sum_{k \in \varphi} p_j(k) \sum_{v \in V} (d_j - d_{j,v}) X_{j,v}(k) \quad (3.9)$$

S.a.

$$\sum_{j \in J} X_{j,v}(k) \leq U \cdot \delta_v(k) \quad \forall v \in V, \forall k \in \varphi, U \geq |J| \quad (3.10)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{k \in \varphi} \delta_v(k) \cdot L_k \leq S \quad (3.11)$$

As equações 3.9 e 3.10 são semelhantes as equações correspondentes na formulação para redes hierárquicas (equações 3.4 e 3.5, respectivamente), tendo apenas o universo de possíveis servidores expandido para qualquer servidor da RDC. Já a equação 3.11 foi modificada para considerar conteúdos de tamanhos não unitários. É importante observar que nesta formulação não existe uma restrição que determine que apenas um servidor deve ser alocado para entregar um conteúdo a um determinado cliente. Esta equação foi removida devido à heurística para o PPRDR utilizada para validar a otimização do espaço de armazenamento em RDCs permitir que, ao longo do tempo de vida das simulações, diferentes servidores sejam alocados para entregar conteúdos aos clientes.

O Capítulo 4 desta dissertação apresenta os resultados de simulação obtidos. A formulação matemática para o PACA apresentado é aplicado em diversos contextos, que influenciam significativamente os resultados obtidos.

Capítulo 4

Cenários de teste e análise dos resultados

Como foi afirmado no Capítulo 3, diversas publicações sobre alocação do espaço de armazenamento em servidores de uma RDC, ou posicionamento destes servidores, não avaliam o impacto destas otimizações em um cenário de operação de uma RDC. O ambiente de operação das RDCs possui características dinâmicas, já que a demanda pelos conteúdos oferecidos pela RDC e a disponibilidade de recursos de rede e nos servidores estão sujeitas a mudanças constantes, muitas vezes significativas. Como os trabalhos anteriores sobre o tema aplicam técnicas de otimização baseados somente em dados de entrada estáticos, os resultados obtidos não necessariamente são benéficos para uma determinada RDC, devido a suas características dinâmicas e critérios de desempenho adotados.

Desta forma, para avaliar o desempenho da solução proposta para o PACA, foram computados resultados de uma solução para o PPRDR utilizando instâncias de teste com o espaço de armazenamento distribuído uniformemente em comparação com instâncias de testes cujo espaço de armazenamento foi otimizado com as diversas metodologias aplicadas. Esta abordagem tem o objetivo de avaliar qual o impacto de uma alocação otimizada do espaço de armazenamento nos custos operacionais de um provedor de RDC.

Neste capítulo, além da apresentação dos resultados obtidos, os conceitos relevantes relacionados com a modelagem matemática do PPRDR são apresentados. Estes conceitos incluem uma descrição da modelagem PPRDR utilizada, que define o modelo de operação da RDC e definições dos custos computados. Além disso, as instâncias de testes que foram utilizadas são detalhadas.

4.1 Modelo de operação de RDCs utilizado

O modelo de operação de uma RDC define, além da topologia da rede sobreposta, as estratégias de replicação de conteúdos e atendimento de requisições. Estas características podem ser entendidas sob a forma de um outro problema de otimização, o PPRDR. O objetivo do PPRDR é definir quais conteúdos devem estar presentes em cada servidor da RDC e qual servidor da RDC deve ser designado para atender uma determinada requisição por conteúdos. Esta seção trata da modelagem para o PPRDR que descreve as características e funcionalidades das RDCs que foram utilizadas para avaliar os resultados obtidos com as soluções para o PACA.

Em um cenário realístico, o PPRDR deve ser definido de forma dinâmica, ou seja, o modelo deve considerar que ao longo do tempo de operação da RDC parâmetros fundamentais, como o custo de comunicação, taxa de requisição dos clientes e a popularidade dos conteúdos, sofrerão alterações. Além disto, o modelo deve ser *online*, o que significa que não existe um conhecimento prévio dos parâmetros fundamentais para períodos de tempo futuros. Isto significa que o modelo de otimização deve tomar decisões apenas com os dados disponíveis para o período de tempo atual e os períodos passados.

Outra funcionalidade importante é a divisibilidade da demanda, que permite que uma requisição seja atendida por mais de um servidor, sendo que cada servidor deve entregar parte do conteúdo solicitado caso isto seja conveniente para reduzir os custos de atendimento. É importante que esta funcionalidade seja incorporada ao modelo de otimização, porém não necessariamente as soluções propostas para o PPRDR devem implementá-la, já que o atendimento das requisições por apenas um servidor pode ser considerado um caso particular da divisibilidade da demanda.

A percepção da qualidade do serviço prestado pela RDC sob o ponto de vista do cliente é fortemente influenciada pelo tempo de espera desde a requisição de um conteúdo até o início da entrega do mesmo. Através da técnica de *backlog* [5], é possível computar um custo adicional no atendimento sempre que for considerado que a entrega dos conteúdos não foi realizada no devido tempo. O *backlog* ocorre quando existem poucas réplicas de um conteúdo entre os servidores da RDC e estes servidores não possuem banda de transmissão disponível para realizar o atendimento. A parte do conteúdo que deveria ser entregue em um determinado momento é acumulada para períodos de tempo subsequentes e são duramente penalizados, pois esta não é uma situação desejável para os provedores de RDC. Devido a esta dura penalização para o *backlog* dentro do modelo de custo definido

para a solução, é preferível que o atendimento seja realizado a partir de um servidor que não atende plenamente aos requisitos de QoS da requisição, pois a penalização para este caso é mais branda.

A funcionalidade de permitir que os conteúdos sejam originados em múltiplos servidores de uma RDC também é desejável, pois além de permitir que os próprios usuários insiram conteúdos na RDC através de seus servidores locais, existe também a vantagem da RDC não necessitar de um servidor central ou no topo de uma estrutura hierárquica como um único ponto de origem de conteúdos. Além disso, é importante contemplar a possibilidade dos conteúdos serem inseridos ou removidos da RDC em qualquer período de tempo de operação, estabelecendo um tempo de vida para os conteúdos dentro da RDC, o que torna o modelo mais genérico e realístico.

A formulação matemática para o PPRDR sob a forma de um PPL, denominada Formulação Dinâmica (FD) [20] contempla estas características relevantes para um cenário realístico de operação de uma RDC. A Função objetivo desta formulação é apresentada na Equação 4.1.

Min

$$\sum_{i \in R} \sum_{j \in S} \sum_{t \in T} c_{ijt} x_{ijt} + \sum_{i \in R} \sum_{t \in T} p_{it} b_{it} + \sum_{k \in C} \sum_{j \in S} \sum_{u \in T} \sum_{v=u}^T L_k y_{kjvu} \quad (4.1)$$

Constantes:

- R conjunto de requisições a serem atendidas
- S conjunto de servidores da RDC
- C conjunto de conteúdos replicados
- T conjunto de períodos de tempo
- L_k o tamanho do conteúdo k (em bytes)
- c_{ijt} custo de atendimento da requisição i no servidor j no período t , calculado pela seguinte equação: $c_{ijt} = (w + RTT(\text{origem}(i), j, t)) \times BR_i$, se $w \leq TD_i$, senão $c_{ijt} = ((w + RTT(\text{origem}(i), j, t)) \times BR_i) + 1000 \times (w - TD_i)$, onde $w = \text{atraso}(\text{origem}(i), j, t) + ld(i)$
- P_{it} penalidade por usar backlog da requisição i no período t calculada pela equação $P_{it} = \max(c_{ijt} \times 2, \forall i \in R, \forall t \in T)$

- $h_{kjl}t$ custo de replicar o conteúdo k no servidor j a partir do servidor l no período t , calculado pela equação $h_{kjl}t = L_k \forall k \in C$

Variáveis:

- x_{ijt} Variável contínua que representa a fração do conteúdo solicitado pela requisição i entregue pelo servidor j no período t .

-

$$y_{kjt} = \begin{cases} 1 & , \text{ se o conteúdo } k \text{ está replicado no servidor } j \text{ no período } t \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases}$$

- b_{it} *backlog* da requisição i no período t

-

$$W_{kjl}t = \begin{cases} 1 & , \text{ se o conteúdo } k \text{ é copiado pelo servidor } j \text{ a partir do servidor } l \text{ no período } t \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases}$$

Como pode ser observado, a função objetivo da formulação FD é composta por somatórios que contemplam os custos associados com a operação de uma RDC: custo de atendimento, representado pela distância entre o ponto de atendimento e o usuário, custo de *backlog*, representado pela quantidade de dados que deixaram de ser entregues, e o custo de replicação, calculado a partir do tamanho do conteúdo a ser transferido.

Esta formulação apresenta dificuldades na resolução de instâncias de pequeno porte (menos que 50 servidores) que possuem recursos de espaço em disco e banda dos servidores mais escassos e canais de comunicação assimétricos, além da quase que incapacidade de resolver instâncias de grande porte (mais que 50 servidores). Neste contexto, o desenvolvimento de métodos heurísticos eficientes para o PPRDR ganha relevância, pois o tempo de resolução é um fator de extrema importância em problemas de otimização *online*.

Para avaliar o ganho de desempenho de uma RDC após a otimização da alocação do seu espaço de armazenamento, foi utilizada uma solução heurística para o PPRDR. A metodologia de avaliação empregada consiste em comparar os custos de atendimento da RDC com servidores com capacidade de armazenamento uniformemente distribuída com os custos de atendimento da mesma RDC com a capacidade total de armazenamento disponível alocada conforme as otimizações realizadas através dos resultados do PACA, sendo que diversas metodologias foram aplicadas na utilização da modelagem do PACA, conforme detalhado na Seção 4.3.

A heurística é baseada em um método de operação patenteado por um provedor de RDC [10], conhecida como *Global Hosting System* (GHS). A GHS consiste em definir, para cada usuário, um servidor local que será responsável pelo atendimento de todas as suas requisições. Caso o conteúdo solicitado esteja presente no servidor local designado, a entrega é realizada através deste servidor. Porém, caso o servidor local não possua armazenado uma cópia do conteúdo solicitado, um processo de replicação deste conteúdo a partir de um outro servidor da RDC é realizado, sendo que o cliente deve aguardar o fim deste procedimento para ter o seu atendimento iniciado. A política de descartes de conteúdos utilizada é a *Least Recently Used* (LRU), que quando necessário descarta a réplica de conteúdo mais antigo replicado no servidor.

Entretanto, a heurística GHS, apesar de ser de fácil implementação, não consegue atingir resultados competitivos quando comparada com outras heurísticas, por limitar o atendimento ao servidor local e não fazer um uso eficiente do conhecimento sobre as demandas dos conteúdos [19]. Esta abordagem tende a gerar uma quantidade considerável de *backlog*, pois se o servidor local designado para o atendimento de determinados clientes não é capaz de realizar a entrega do conteúdo solicitado, não existe a possibilidade de um outro servidor da RDC realizar este atendimento. Desta forma, foi proposta em [19] uma versão otimizada do GHS, denominada *Optimized GHS* (OGHS). Na heurística OGHS, a replicação de conteúdos e a política de descarte de réplicas não sofreram alterações, porém é permitida à RDC atender uma requisição a partir de qualquer servidor disponível. A decisão de qual servidor deve atender cada requisição, ou seja, a solução do PDR é realizada através da formulação RF, cuja função objetivo é descrita na Equação 4.2. A heurística OGHS utilizada nesta dissertação teve ainda a sua política de descartes de réplicas modificada. A nova política de descartes de réplicas implementada consiste em, a partir do resultado de um estimador, remover as réplicas que possuem menos chances de serem requisitadas em períodos de tempo futuros.

Min

$$\sum_{i \in R} \sum_{j \in S} c_{ijt} x_{ijt} + \sum_{i \in R} p_i b_i \quad (4.2)$$

4.2 Cenários de teste

Como afirmado anteriormente, os testes realizados nesta dissertação consistem em aplicar técnicas de otimização da alocação do espaço de armazenamento nos servidores da RDC

e verificar qual o ganho obtido com esta otimização no sentido de reduzir os custos de replicação de conteúdos e atendimento às requisições dos clientes. Desta forma, é importante destacar que dois processos distintos porém relacionados são realizados. O primeiro processo é a solução da formulação do PACA sob a forma de um PPL, cujos dados de entrada são obtidos a partir de instâncias de teste para o PPRDR, já que estas instâncias descrevem os dados de entrada necessários para o PACA, ou seja, as informações sobre os clientes, a rede e os servidores da RDC. Já o segundo processo consiste em verificar alterações de desempenho em uma solução heurística para o PPRDR dado que a alocação do espaço de armazenamento foi otimizada pelo processo anterior. Além disso, diversas metodologias foram utilizadas no que diz respeito à aplicação dos dados de entrada para a solução da formulação do PACA utilizada. Estas metodologias diferem quanto ao nível de conhecimento futuro concedido ao modelo de solução para o PACA e também à possibilidade de coleta dos dados de entrada do PACA e aplicação dos resultados durante a operação da RDC.

As instâncias para o PPRDR consistem em arquivos de texto que representam as características das requisições, topologia de rede, e os demais parâmetros necessários.

Uma importante consequência da metodologia de testes utilizada nesta dissertação é que, devido ao fato das soluções obtidas para o PACA não serem analisadas de forma isolada, e sim a partir de alterações no desempenho de operação da RDC, não necessariamente as otimizações realizadas trarão efeitos benéficos para a RDC. Isto se deve ao fato de que as características dinâmicas do PPRDR não estarem plenamente mapeadas na modelagem do PACA. De fato, a solução proposta para o PACA tem o objetivo de alocar mais espaço de armazenamento em servidores cujos clientes locais possuem uma alta taxa de requisição de conteúdos e estão mais distantes em termos dos custos de comunicação para os outros servidores da RDC serem mais elevados, o que não necessariamente trará benefícios para certos cenários de operação das RDCs.

A princípio, foram geradas pelo autor instâncias de testes sintéticas para o PPRDR com o objetivo de se validar uma metodologia básica de otimização do espaço de armazenamento em RDCs. Estas instâncias de teste não possuem restrição de banda de transmissão nos servidores, o que é uma característica desejável para a solução do PACA utilizada, uma vez que a modelagem não considera esta restrição. Uma outra característica relevante deste grupo de instâncias é uma maior concentração das requisições em determinados servidores da RDC, o que colabora com o ganho de desempenho da RDC quando são aplicadas metodologias para otimizar a alocação do espaço de armazenamento

nos servidores da RDC. A partir destas instâncias de teste, os primeiros resultados para o PACA foram obtidos [33], o que serviu como motivação para o desenvolvimento de novas abordagens de solução do PACA e utilização de outras instâncias de teste encontradas na literatura.

As demais instâncias de testes para o PPRDR utilizadas neste trabalho foram formuladas pelos autores de [19] para dar suporte à avaliação de diversas abordagens exatas e heurísticas para o PPRDR. Desta forma, cada instância de teste descreve as características que compõem o cenário de RDC a ser simulado, como o número de servidores da RDC, capacidade de armazenamento dos servidores, tamanho dos conteúdos, características das requisições como requisitos de QoS, dentre outras.

Conforme descrito em [31], foram geradas quatro classes de instâncias para o PPRDR: A, B, C, D. Entretanto, as instâncias da classe A e B não são relevantes para as simulações realizadas nesta dissertação, uma vez que não possuem restrições de espaço de armazenamento nos servidores, já que cada servidor possui disponível um espaço de armazenamento superior à soma dos tamanhos de todos os conteúdos presentes na RDC. Já as instâncias da classe C e D possuem servidores com um menor espaço de armazenamento, o que as torna interessantes dentro do contexto desta dissertação. As instâncias da classe D possuem ainda uma maior restrição de banda de transmissão dos servidores, canais de comunicação assimétricos e um menor espaço de armazenamento total disponível para ser alocado quando comparado com a quantidade e tamanho de conteúdos presentes na RDC, o que aumenta a complexidade da solução. A partir destas instâncias para o PPRDR foram extraídos os dados necessários para a solução do PACA.

4.3 Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados de simulação obtidos. Estes resultados são apresentados a partir de uma comparação dos custos de replicação e entrega de conteúdos das instâncias de teste originais, com alocação do espaço de armazenamento uniformemente distribuída com instâncias de testes modificadas com os resultados obtidos para o PACA.

As soluções para o PACA foram obtidas a partir das metodologias descritas a seguir:

- **Offline Static:** Nesta abordagem, as informações contidas nas instâncias do PPRDR foram processadas de forma sumarizada e a nova alocação do espaço de armazena-

mento obtida foi aplicada de forma estática. Valores médios de taxas de requisição, popularidades dos conteúdos e custos de comunicação foram computados a partir dos dados de cada período de tempo das instâncias do PPRDR e aplicados ao PPL utilizado para solucionar o PACA. Esta abordagem se vale do conhecimento futuro da operação da RDC, porém a alocação do espaço de armazenamento é realizada apenas uma vez e é válida por todos os períodos de tempo de execução da nova instância para o PPRDR gerada;

- **Offline Dynamic:** De forma semelhante a *Offline Static*, esta abordagem também utiliza o conhecimento futuro da operação da RDC. Entretanto, o PACA é resolvido de forma independente para cada período de tempo das instâncias do PPRDR, com o objetivo de se capturar as características dinâmicas do PPRDR. Desta forma, para cada período de tempo das novas instâncias para o PPRDR geradas, a alocação do espaço de armazenamento em cada servidor da RDC é alterada de acordo com os valores de taxas de requisições, popularidade de conteúdos e custos de comunicação das instâncias para o PPRDR originais;
- **Online Dynamic:** Diferente das outras duas abordagens anteriores, a abordagem *Online Dynamic* não utiliza conhecimento futuro da operação da RDC. Isto é um fator desejável, já que em situações reais estes dados não estarão disponíveis. Nesta abordagem, a alocação do espaço de armazenamento é computada através de um método heurístico baseado em um estimador de demandas futuras conhecido como Based On Trends Estimator (BOTE) [19] e em parâmetros de desempenho que constam na modelagem exata para o PACA utilizada para obter os resultados das abordagens anteriores;

Além disso, para efeitos de comparação, os resultados foram também computados para os seguintes instâncias de teste para o PPRDR:

- **Offline Uniform:** Estas são as instâncias originais para o PPRDR, e a alocação do espaço de armazenamento de seus servidores é uniformemente distribuída;
- **Offline Over:** Nesta abordagem, o espaço de armazenamento dos servidores foi superdimensionado, ou seja, cada servidor das novas instâncias para o PPRDR possui um espaço de armazenamento maior que a soma de tamanhos de todos os conteúdos presentes na RDC. Desta forma, os resultados desta abordagem servem como um comparativo de desempenho para as outras abordagens, já que nenhum

processo de otimização do espaço de armazenamento pode obter melhores resultados do que uma alocação superdimensionada.

4.3.1 Instâncias sintéticas: Ausência de restrições de banda de transmissão nos servidores e maior concentração da origem das requisições

Estes são resultados preliminares obtidos, e por este motivo apenas uma abordagem de otimização do espaço de armazenamento foi aplicada. Esta abordagem é a *offline static*, que é comparada com uma alocação uniforme do espaço de armazenamento. Nos gráficos desta seção, os resultados obtidos a partir da versão *offline static* do PACA são denotados como "Opt" enquanto que os resultados obtidos com uma alocação uniforme do espaço de armazenamento são denotados como "Ori". A Figura 4.1 apresenta os custos de replicação, atendimento e totais para as instâncias sintéticas.

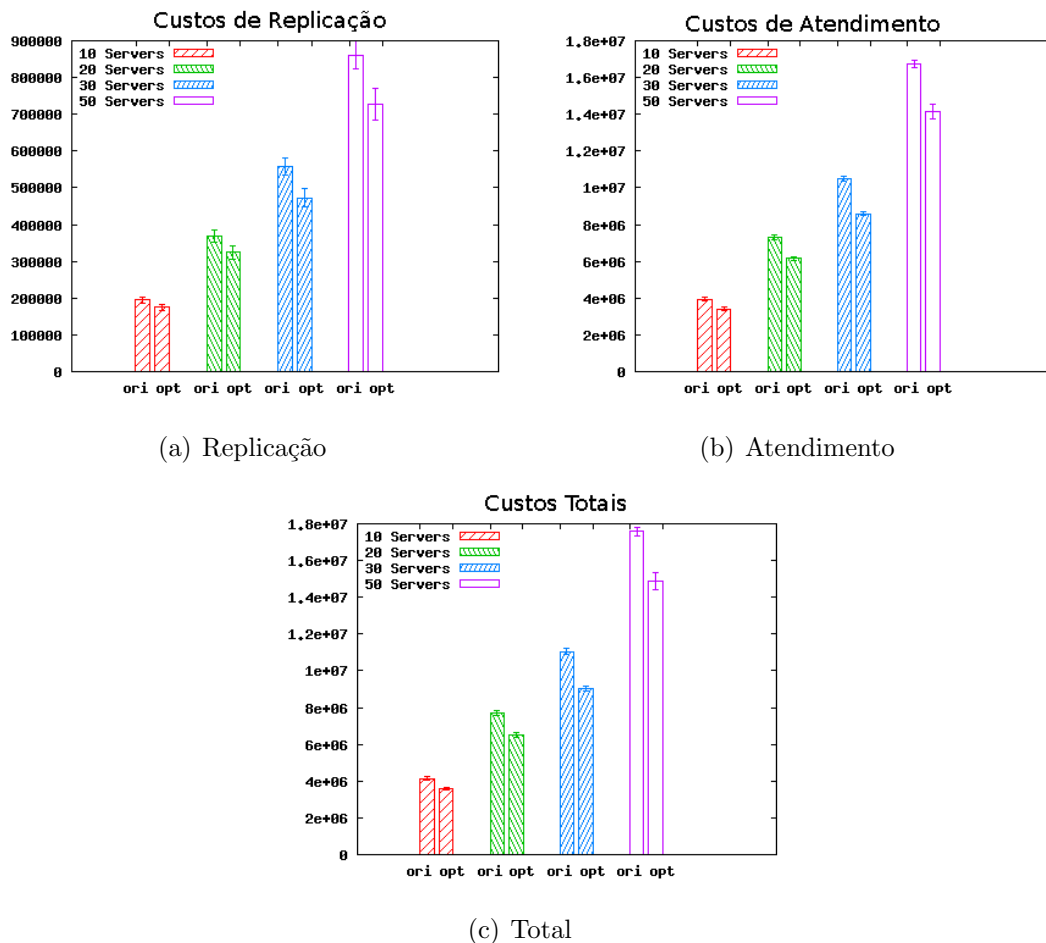


Figura 4.1: Custos para as Instâncias Sintéticas.

Como pode ser observado, para as instâncias sintéticas, a otimização da alocação do

espaço de armazenamento através da abordagem *offline static* foi capaz de reduzir os custos de replicação e atendimento, e por consequência os custos totais. Estes resultados eram esperados, uma vez que nestas instâncias existe uma variação significativa na quantidade de requisições originadas em cada servidor, o que aumenta o ganho potencial da otimização do espaço de armazenamento, quando comparado com uma alocação uniformemente distribuída. Além disso, a ausência de restrições de banda de transmissão nos servidores é extremamente benéfico para a modelagem do PACA proposta, uma vez que o espaço de armazenamento alocado em cada servidor, mesmo que este espaço seja proporcionalmente elevado, pode ser aproveitado pela RDC independentemente do número de requisições direcionadas para o servidor.

Apesar dos bons resultados obtidos, foi constatada a necessidade de utilizar outras instâncias de testes encontradas na literatura, com o objetivo de se validar a metodologia desenvolvida para otimizar a alocação da capacidade de armazenamento em cenários menos favoráveis. Estas são as instâncias da classe C, que apesar de não possuírem restrições relevantes de banda de transmissão, possuem uma menor variação da distribuição de requisições entre os servidores, e as instâncias da classe D, que possuem restrições mais severas de banda de transmissão dos servidores, menor variação da distribuição de requisições entre os servidores e um menor espaço total de armazenamento disponível quando comparado com a soma dos tamanhos dos conteúdos disponíveis na RDC.

4.3.2 Instâncias classe C: menor restrição de banda de transmissão nos servidores

Como afirmado anteriormente neste capítulo, as instâncias da Classe C possuem restrições de banda de transmissão nos servidores mais amenas. A Figura 4.2 apresenta os custos de replicação para as instâncias da classe C.

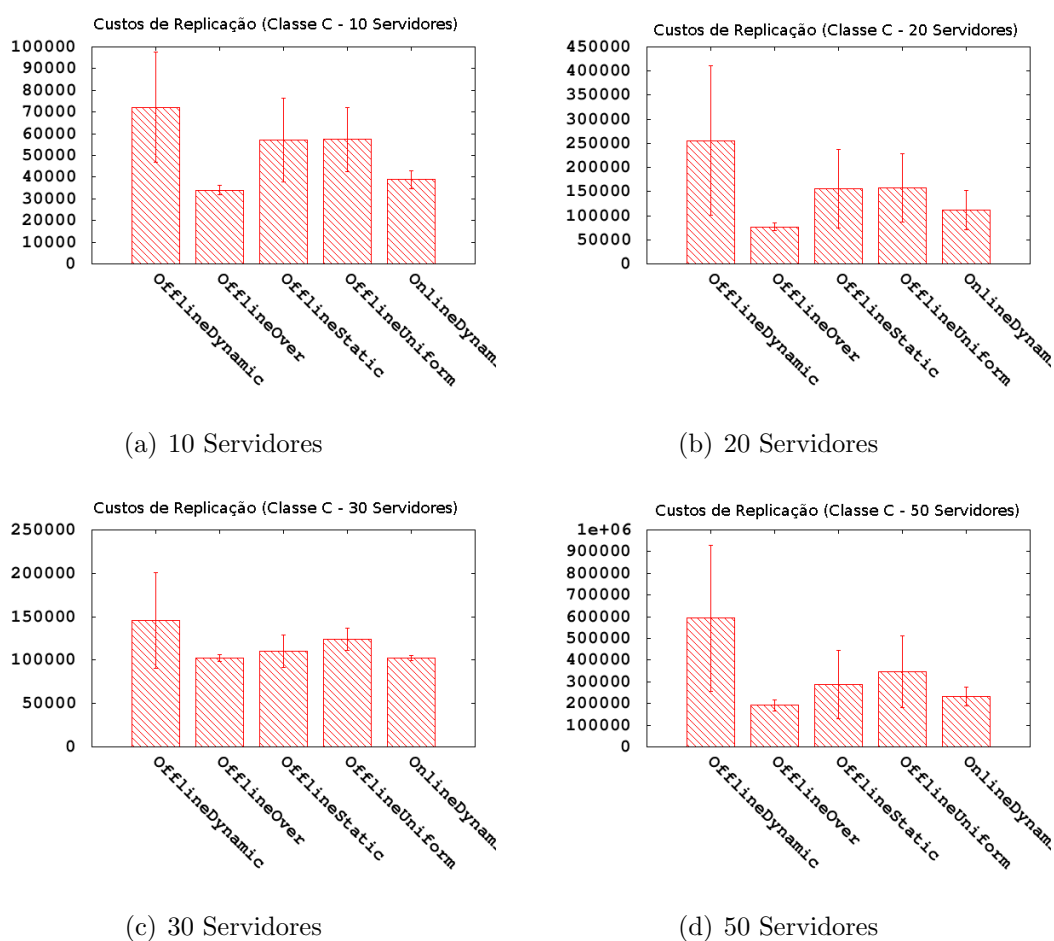


Figura 4.2: Custos de replicação para as instâncias da classe C.

Como esperado, a abordagem *Offline Over* obteve os melhores resultados, já que o espaço alocado nos servidores é superior à soma dos tamanhos de todos os conteúdos presentes na RDC. Desta forma, replicações ocorrem apenas nos períodos iniciais da simulação, pois rapidamente todos os servidores da RDC terão armazenado todo o conjunto de conteúdos disponíveis e nenhuma remoção de conteúdos será necessária.

A abordagem *Offline Dynamic* obteve os custos de replicação mais elevados. Apesar do conhecimento prévio das taxas de requisições, popularidade dos conteúdos e custos de comunicação na RDC, a elevada variação do espaço de armazenamento nos servidores conforme os resultados do PACA a cada período de tempo de simulação introduzem efeitos bastante prejudiciais ao desempenho do algoritmo de replicação. Os resultados do PACA baseados em dados de apenas um período tendem a variar consideravelmente, pois as taxas de requisições, popularidade dos conteúdos e custos de comunicação são dinâmicos. Desta forma, em períodos de tempo em que os clientes locais de um determinado servidor reduzem a demandam por conteúdos, o espaço de armazenamento deste servidor pode ser

drasticamente reduzido, e por consequência diversos conteúdos serão removidos. Quando houver mais espaço de armazenamento disponível em um servidor, por consequência de um incremento da taxa de requisição de seus clientes locais, um elevado número de requisições será realizado pois existe espaço de armazenamento disponível nos servidores em conjunto com uma maior taxa de requisição. Entretanto, estes conteúdos que foram replicados podem ser removidos em períodos de tempo subsequentes próximos, caso ocorra uma variação dos dos parâmetros de entrada para o PACA que resultem em uma redução do espaço de armazenamento deste servidor.

Os elevados custos de replicação da abordagem *Offline Dynamic* evidenciam que mesmo que seja possível conhecer com exatidão os parâmetros para o PACA para períodos de tempo futuros, o que é improvável, as características dinâmicas das RDCs conforme modeladas nas instâncias para o PPRDR não são tratadas de forma satisfatória pelo PACA. Um ponto a ser observado é os dados de entrada para o PACA não necessariamente representam a demanda por conteúdos presentes nos servidores da RDC durante as simulações, uma vez que as requisições por conteúdos geralmente não são atendidas em um único período de tempo e são portanto acumuladas, tendo o seu atendimento realizado durante os períodos de tempo necessários para completar a entrega, conforme as limitações de banda de transmissão dos clientes e dos servidores.

A abordagem *Online Dynamic* obteve os resultados mais próximos dos considerados ótimos no contexto das simulações realizadas. A alocação dinâmica do espaço de armazenamento baseado na estimativa da demanda por cada conteúdo faz com que menos remoções de conteúdos sejam realizadas, já que uma parcela maior do espaço de armazenamento disponível será alocada em servidores cujos usuários locais estão realizando um maior número de requisições. Estas remoções tendem a gerar eventos de replicação de conteúdos na RDC, pois conteúdos removidos, por muitas vezes, serão requisitados novamente e por consequência selecionados para replicação para reduzir os custos de atendimento de requisições.

Apesar da abordagem *Offline Static* ter obtido melhores resultados que a alocação uniformemente distribuída das instâncias originais (*Offline Uniform*), o ganho obtido não foi expressivo. Isto se deve ao fato da abordagem *Offline Static* ter como dados de entrada do PACA valores médios da taxa de requisição, popularidade de conteúdos e custos de comunicação da RDC. Apesar da variação dos parâmetros do PACA serem significativas entre os períodos de tempo de simulação, o mesmo não é válido quando os parâmetros são calculados a partir de valores médios de todos os períodos de simulação. De fato, a

alocação do espaço de armazenamento destes dois métodos foram semelhantes.

A Figura 4.3 mostra o custo de atendimento de requisições para as instâncias da classe C. Na abordagem *Offline Over*, como existe uma capacidade de armazenamento ilimitada no contexto das simulações realizadas, salvo nos períodos de tempo iniciais da simulação as requisições por conteúdos são realizadas a partir dos servidores locais, que por estarem próximos do cliente conseguem realizar a entrega de conteúdos com um custo reduzido.

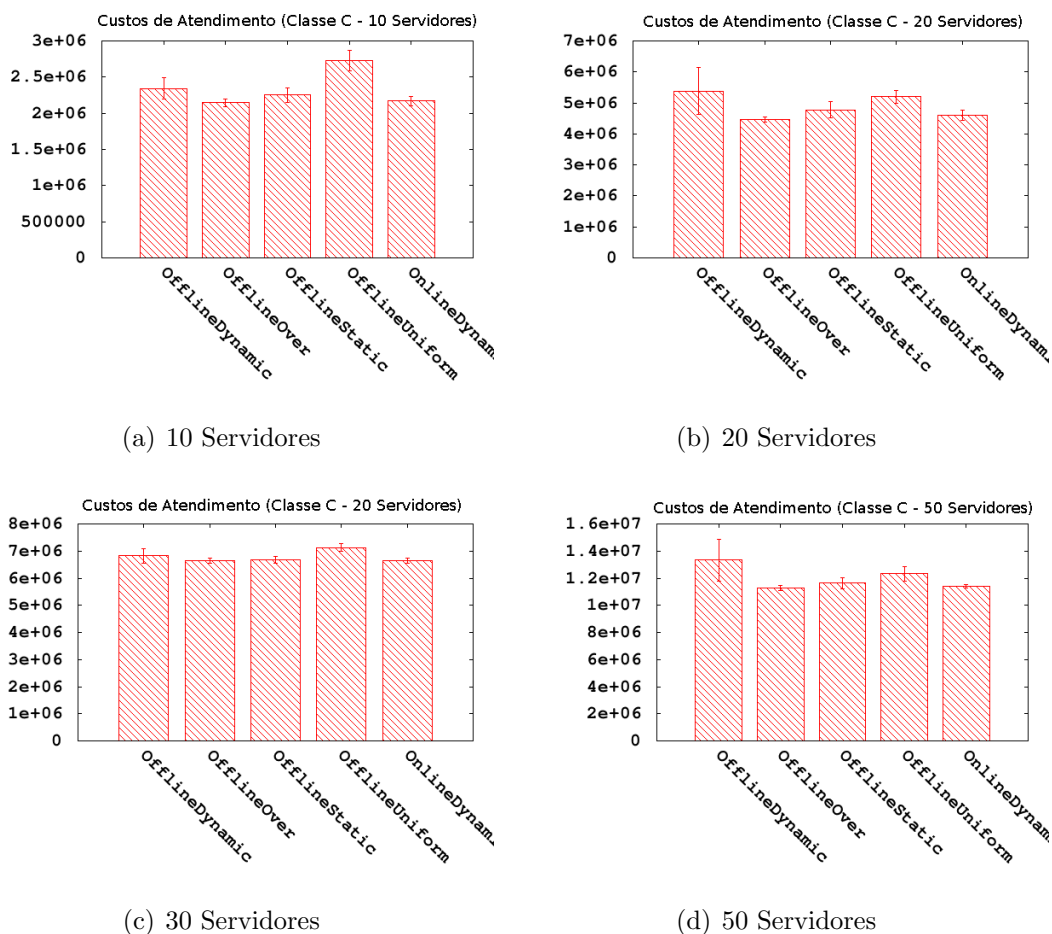


Figura 4.3: Custos de atendimento para as instâncias da classe C.

A abordagem *Online Dynamic* novamente obteve resultados próximos da *Offline Over*. Isto se deve ao fato da alocação do espaço de armazenamento nos servidores da RDC ser realizada com base em uma estimativa da demanda, proporcionando um cenário em que existe uma alta probabilidade das requisições serem atendidas localmente.

Os custos de atendimento de requisições da abordagem *Offline Dynamic* não apresentam um padrão consistente entre instâncias com diferente número de servidores. Os grupos de instâncias cujos custos de atendimento de requisições foi elevado (20 e 50 servidores) coincide com aqueles em que o custo de replicação foram mais elevados quando

comparados com as outras abordagens. Para os grupos de 10 e 30 servidores, o custo de atendimento de requisições foi menor do que o esperado. Este resultado não era esperado, sendo necessária uma investigação mais minuciosa para um melhor esclarecimento.

A abordagem *Offline Static* resultou em baixos custos de atendimento de requisições, sendo superada apenas pelas abordagens *Online Dynamic* e *Offline Over*. Isto demonstra que modificações na alocação da capacidade de armazenamento baseado na sumarização dos dados de entrada do PACA de um conjunto de períodos de tempo são efetivas em reduzir os custos de atendimento de requisições em RDCs, mesmo que estas modificações não sejam tão expressivas quando comparados com uma alocação quase que uniforme, aplicada na abordagem *Offline Uniform*.

Devido às restrições de banda dos servidores mais amenas, não ocorreram custos de *backlog* nas instâncias da Classe C. Isto se deve ao fato do backlog ser gerado quando um conteúdo solicitado está presente somente em servidores que não possuem banda de transmissão disponível para realizar o atendimento. Como não ocorrem eventos de escassez de banda nas instâncias da Classe C, todas as requisições podem ser atendidas imediatamente por algum servidor da RDC, mesmo que a partir de um servidor com um maior custo de comunicação com o cliente solicitante. A figura 4.4 apresenta os custos totais para as instâncias da classe C, que são determinados principalmente pelo custo de atendimento de requisições.

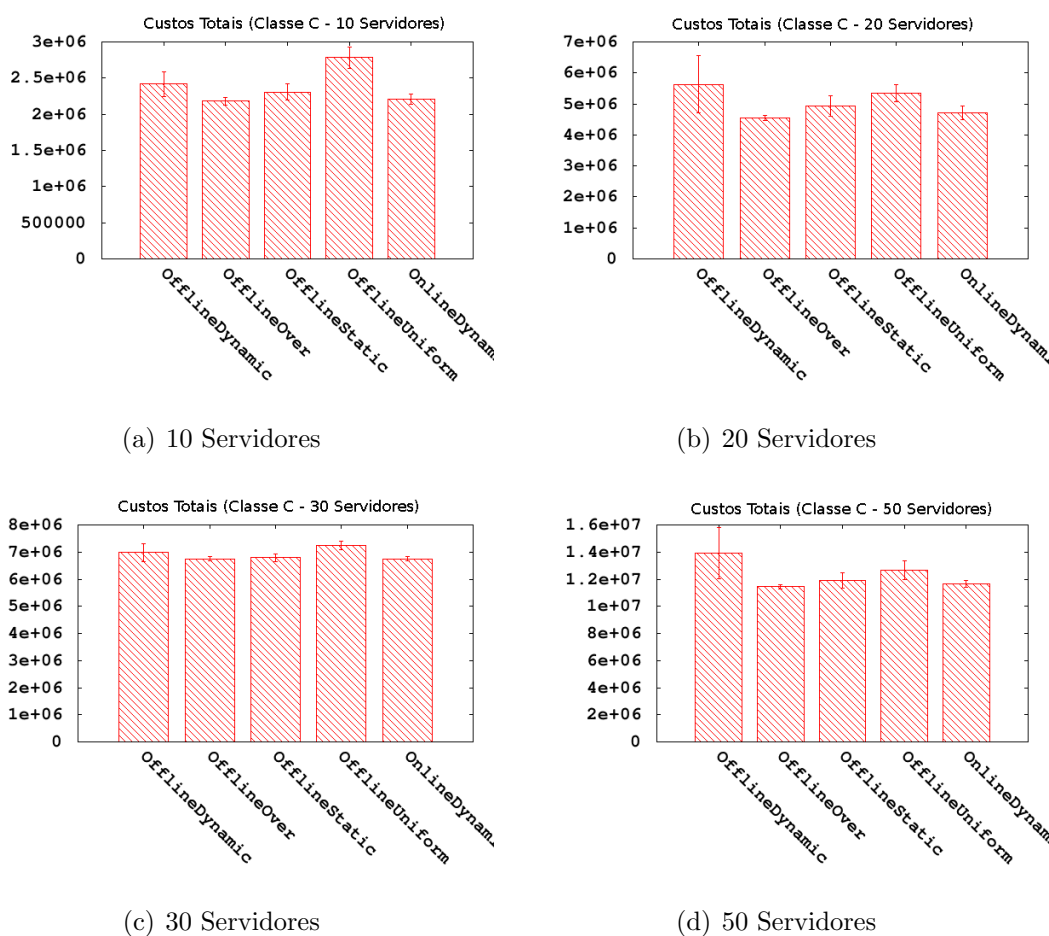


Figura 4.4: Custos totais para as instâncias da classe C.

4.3.3 Instâncias classe D: maior restrição de banda de transmissão nos servidores

As restrições mais severas de banda de transmissão dos servidores nas instâncias da classe D introduzem uma característica que não é tratada na modelagem do PACA. Neste cenário, uma otimização da capacidade de armazenamento que não leva em conta a capacidade dos servidores de entregar os conteúdos armazenados faz com que nos servidores que possuem uma alta demanda de conteúdos proveniente de seus clientes locais seja alocada uma grande capacidade de armazenamento que não será devidamente aproveitada, já que a banda de transmissão será o fator limitante. Além disso, nos servidores em que existe uma menor demanda por conteúdos, e que portanto tem o seu desempenho menos afetado por conta de restrições mais severas de banda de transmissão, será predominante a escassez de espaço de armazenamento.

A Figura 4.5 apresenta os custos de replicação para as instâncias da classe D:

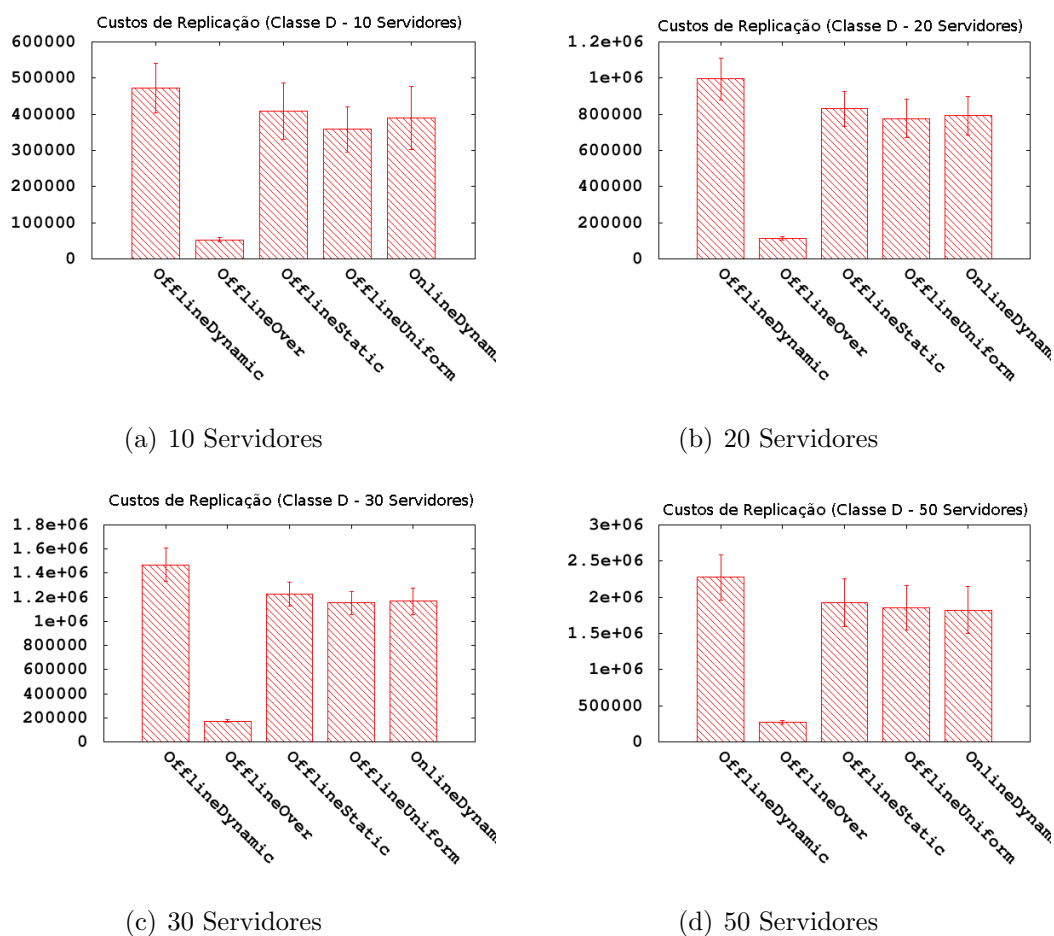


Figura 4.5: Custos de replicação para as instâncias da classe D.

É possível observar que, quando comparado com a abordagem *Offline Over*, as demais abordagens apresentam um custo de replicação elevado. Isto se deve ao fato de nas instâncias de Classe D existirem mais conteúdos e com um tamanho médio maior, além de um espaço de armazenamento total disponível menor. Desta forma, como estas características implicam naturalmente em um maior número de replicações, os custos de replicação das abordagens que não consideram um espaço de armazenamento superdimensionado foram mais elevados.

A abordagem *Offline Dynamic* novamente obteve os piores resultados, por conta dos efeitos indesejáveis causados pela alta variação da alocação do espaço de armazenamento entre os servidores. Entretanto, para as demais abordagens, os custos de replicação são próximos e não existe um padrão consistente entre os diferentes grupos de quantidade de servidores simulados.

Como pode ser observado na Figura 4.6, o custo de atendimento para a abordagem *Online Dynamic* foi o mais elevado devido à ocorrência de *backlog*. O grande intervalo de

confiança das instâncias de 20 servidores é explicado pelo fato do *backlog* ter ocorrido em apenas algumas instâncias simuladas.

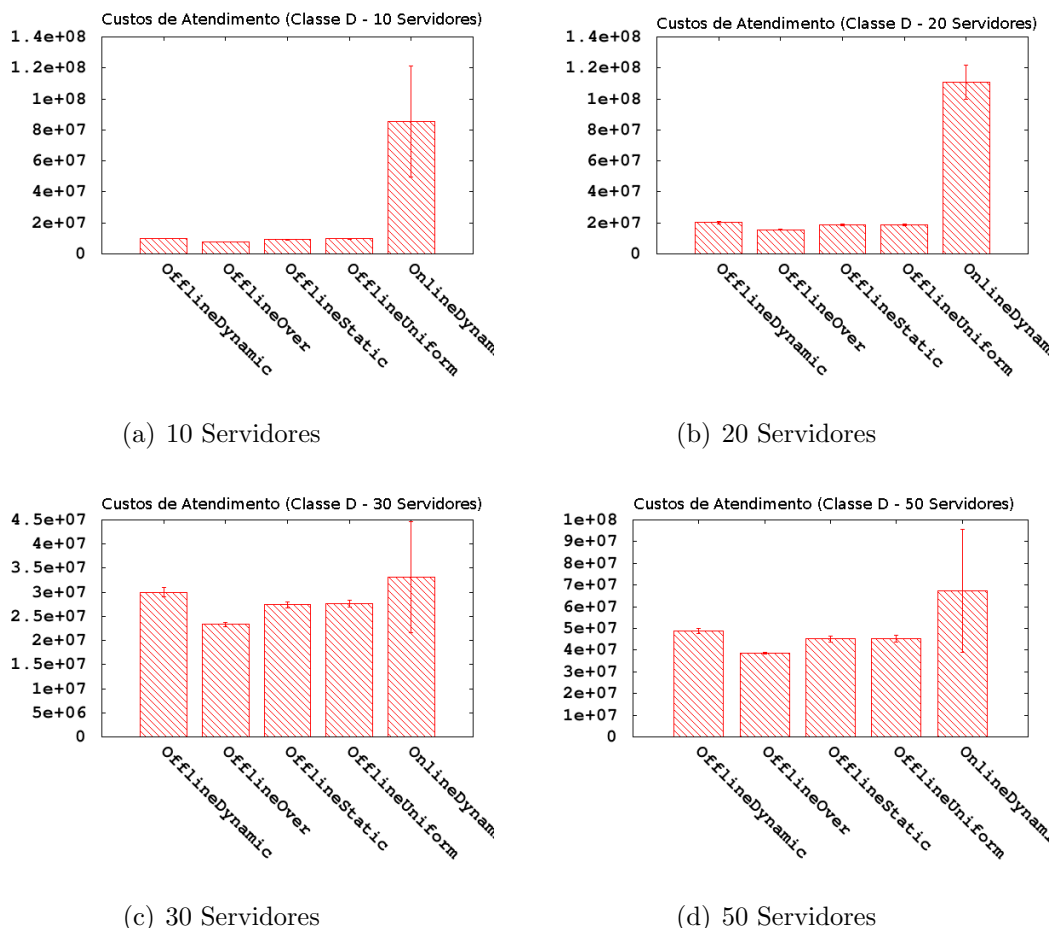
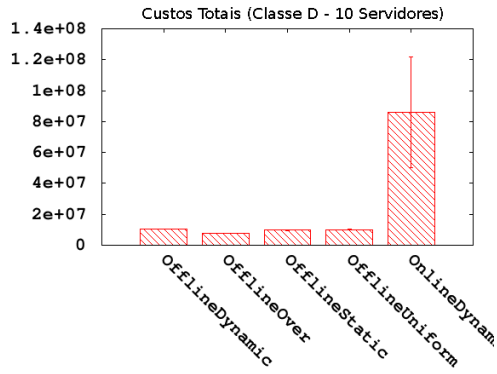


Figura 4.6: Custos de atendimento para as instâncias da classe D.

A alocação de espaço de armazenamento baseada em uma estimativa da demanda futura utilizada na abordagem *Online Dynamic* não se mostrou eficaz para cenários com maior restrição de banda de transmissão nos servidores. Esta abordagem aloca uma maior quantidade de espaço de armazenamento em servidores que possuem uma alta taxa de requisição por conteúdos a partir de seus usuários locais, porém ao não considerar as limitações de banda de transmissão nestes servidores, o espaço de armazenamento adicional alocado não é bem aproveitado. Este resultado evidencia que em cenários com limitações nas taxas de transmissão nos servidores da RDC, a alocação dinâmica do espaço de armazenamento baseado na carga de requisições dos servidores deve levar em consideração a limitação de banda de transmissão nos servidores, tendo em vista que nas instâncias da Classe C esta abordagem atingiu bons resultados, próximos inclusive do ótimo.

A Figura 4.7 apresenta os custos totais para as instâncias da classe D. De forma semelhante aos resultados das instâncias de classe C, o custo total é fortemente influenciado pelos custos de atendimento.



(a) 10 Servidores



(b) 20 Servidores



(c) 30 Servidores



(d) 50 Servidores

Figura 4.7: Custos totais para as instâncias da classe D.

Capítulo 5

Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho, técnicas de otimização do espaço de armazenamento em RDCs foram analisadas. A alocação do espaço de armazenamento é um fator importante em cenários de operação de RDCs em que existe uma grande quantidade de conteúdos de tamanho elevado, quando comparado com o espaço total de armazenamento disponível entre os servidores da RDC. Os resultados obtidos a partir das simulações realizadas demonstram que uma alocação do espaço de armazenamento otimizada pode reduzir os custos associados com a replicação e entrega de conteúdos em uma RDC.

Os bons resultados obtidos com as instâncias sintéticas ao ser utilizada a abordagem *offline static* para solucionar o PACA evidenciam o potencial da otimização da alocação da capacidade de armazenamento em reduzir os custos operacionais de uma RDC. Como foi comentado anteriormente, estas instâncias representam um cenário desfavorável para alocações uniformes do espaço de armazenamento, já que existe uma maior variação na distribuição das requisições por conteúdos entre os servidores da RDC. Além disso, estas instâncias não possuem restrições de banda de transmissão nos servidores da RDC, o que beneficia a modelagem proposta para o PACA neste dissertação. Desta forma, como evidenciado nos resultados obtidos nas instâncias da classe C e classe D, não necessariamente os resultados obtidos com as instâncias sintéticas podem ser repetidos em qualquer cenário de RDC que possa ser concebido.

O fato da abordagem *Offline Dynamic* ter obtidos resultados ruins evidencia que nem sempre é possível modelar de forma satisfatória em soluções para o PACA fatores dinâmicos relacionados com o PPRDR. A princípio, esta abordagem traria vantagens quando comparada com a abordagem *Offline Static*, pois diferente desta, a abordagem *Offline Dynamic* é capaz de obter seus parâmetros de entrada de forma mais granular, e adequar a capacidade de armazenamento a cada período de tempo. Entretanto, como foi exposto no Capítulo 4, esta abordagem gera uma alta variação na capacidade dos servi-

dores da RDC, o que introduz efeitos negativos que degradam a performance da RDC. É possível portanto concluir que apesar das soluções para o PACA utilizadas nas abordagens *offline* desta dissertação serem pautadas em metodologias exatas, os resultados obtidos não podem ser considerados ótimos no contexto desta dissertação, uma vez que não são capazes de modelar com precisão as características dinâmicas do PPRDR, o que se evidencia em determinados cenários.

Para cenários em que as restrições de banda de transmissão nos servidores são severas, uma otimização do espaço de armazenamento que não leva em conta este fator não é capaz de obter resultados satisfatórios. Nestes cenários, inserir restrições que considerem a banda de transmissão nos servidores da RDC se torna essencial, e não apenas desejável. Entretanto, segundo [14], a inserção de restrições na solução do PACA para restringir o espaço de armazenamento a partir da banda de transmissão disponível nos servidores tem o efeito de tornar a alocação do espaço de armazenamento mais uniforme. A abordagem *Offline Static* produz este efeito por tomar decisões baseada em valores médios dos dados de entrada. Desta forma, apesar de ser relevante a introdução desta restrição às soluções *offline* abordadas nesta dissertação, não são esperados resultados que difiram significativamente dos já encontrados. Além disso, a restrição implementada em [14] não leva em consideração o fato de que um servidor pode se beneficiar em ter espaço suficiente para armazenar uma réplica de um determinado conteúdo para atender requisições futuras, mesmo em situações de baixa disponibilidade de banda de transmissão disponível, o que mais uma vez evidencia a complexidade de introduzir elementos dinâmicos pertencentes ao PPRDR a soluções *offline* do PACA.

Já para a abordagem *Online Dynamic*, a incorporação de restrições relacionadas com a capacidade atual de banda nos servidores é promissora. Isto porque em cenários em que não existe uma restrição severa de banda de transmissão (instâncias da classe C), esta abordagem superou em performance as demais. De fato, sem incorporar a limitação da capacidade de banda de transmissão dos servidores, como a alocação da capacidade de armazenamento é realizada de forma proporcional à carga de requisições experimentada por cada servidor, o processo de otimização dinâmica da capacidade de armazenamento dos servidores faz com que uma elevada quantidade de espaço de armazenamento seja alocada em servidores com alta carga de requisições, que por sua vez terão sua banda de transmissão ocupada. Desta forma, espera-se que o controle da banda de transmissão dos servidores durante o processo dinâmico de otimização da capacidade de armazenamento faça com que esta abordagem consiga atingir os mesmos bons resultados obtidos com as instâncias da classe C, em cenários com maior restrição da banda de transmissão.

Nesta dissertação destacam-se as seguintes contribuições:

- **modificação da solução proposta para o PACA em [14] para suportar RDCs sem topologia definida:** Esta modificação permite que o modelo proposto em [14] seja utilizado em RDCs sem uma topologia definida ou sem um relacionamento hierárquico entre os servidores previamente definido. Esta modificação torna a solução mais genérica, pois diversas configurações de topologia e relacionamento hierárquico entre servidores podem ter o seu espaço de armazenamento otimizado, já que estas peculiaridades podem ser capturada a partir dos dados de entrada do modelo. Esta proposta foi publicada pelo autor desta dissertação em [33], artigo que detalha a metodologia aplicada e resultados obtidos. Além disso, a solução proposta em [14] foi modificada para suportar conteúdos de tamanho não unitário, o que reduz consideravelmente o número de variáveis necessárias para descrever o modelo, e por consequência a sua complexidade;
- **abordagem *Offline Static*:** Esta solução para o PACA foi a primeira a ser implementada e motivou a implementação das demais abordagens. A utilização de valores médios dos dados de entrada para o PACA suavizam as alterações realizadas no espaço de armazenamento alocado em cada servidor, já que as variações das taxas de requisições, popularidade dos conteúdos e custos de comunicação ao longo do tempo de vida da simulação PPRDR não são computadas. Apesar disto, bons resultados foram obtidos quando comparado com uma alocação uniformemente distribuída do espaço de armazenamento, e esta abordagem, quando comparadas com as demais, pode ser considerada menos complexa tanto no que tange à apuração dos dados de entrada quanto ao custo computacional da solução, e portanto de utilização facilitada em cenários reais;
- **abordagem *Offline Dynamic*:** Esta abordagem foi desenvolvida com o objetivo de capturar no processo de otimização da alocação do espaço de armazenamento fatores dinâmicos relacionados ao PPRDR. Entretanto, esta abordagem não obteve bons resultados, principalmente devido à alta variação do espaço de armazenamento dos servidores da RDC ao longo dos períodos de simulação. Apesar disto, os resultados obtidos com esta abordagem são interessantes no sentido de que evidenciam que a incorporação de parâmetros dinâmicos do PPRDR em soluções *offline* para o PACA é uma tarefa complexa e nem sempre obterá os resultados esperados;
- **abordagem *Online Dynamic*:** A partir dos resultados da abordagem *Offline Dynamic*, ficou evidente que uma otimização dinâmica da alocação do espaço de

armazenamento dos servidores de uma RDC deve ser *online*, para que seja possível considerar o estado corrente da RDC devido aos fatores dinâmicos inerentes à sua operação, cuja incorporação em um modelo *offline* se mostrou ineficaz. Ao utilizar um estimador da carga futura de requisições por conteúdos nos servidores, baseado na variação da carga de requisições atuais, bons resultados foram obtidos pois a alocação dinâmica do espaço de armazenamento dos servidores neste contexto leva em consideração a necessidade por espaço de armazenamento atual de cada servidor.

Com relação à aplicabilidades dos resultados obtidos em RDCs reais, alguns quesitos merecem ser comentados. Primeiramente, qualquer metodologia de otimização do espaço de armazenamento em servidores de uma RDC só deve ser considerada caso existam restrições relevantes de espaço de armazenamento nos servidores da RDC. Existem RDCs que distribuem conteúdos que em sua maioria não possuem um tamanho considerado elevado, e também RDCs em que o interesse dos usuários é concentrado em poucos conteúdos, que podem facilmente ser acomodados nos servidores. Neste contexto, um processo de otimização com o objetivo de posicionar servidores dentre as localidades disponíveis é mais adequado.

Outro ponto relevante é que as abordagens *offline* apresentadas nesta dissertação possuem conhecimento futuro de seus dados de entrada. Isto significa que as taxas de requisição, popularidade dos conteúdos e custos de comunicação da RDC são previamente conhecidos para todos os períodos de simulação, o que não é factível em cenários reais. Ainda que segundo [16] distorções nos parâmetros do PACA não introduzam grandes variações nos resultados e que estes parâmetros possam ser estimados, sempre existirá a possibilidade de ocorrências de aumentos súbitos nas taxas de requisições dos clientes por conta de um grande aumento de popularidade de um determinado conteúdo, o que não pode ser previsto.

Para lidar com esta imprevisibilidade da demanda por conteúdos em cenários reais, é preciso alocar a capacidade dos servidores da RDC dinamicamente, conforme as variações no cenário ocorrem. Para que isto seja possível, é necessário que os servidores da RDC sejam implementados a partir de máquinas virtuais em uma infraestrutura física compartilhada em que seja possível distribuir dinamicamente os recursos físicos entre os diversos serviços que os compartilham. Obviamente é desejável que exista algum ganho para os administradores da RDC ao liberar espaço de armazenamento em seus servidores, porém só o fato de disponibilizar recursos ociosos que podem ser requisitados por outros serviços já é relevante por si só.

A heurística de otimização dinâmica da capacidade de armazenamento em RDCs tem como dados de entrada a carga de requisições dos servidores. Como estes dados já são utilizados pela heurística de replicação utilizada na solução da PPRDR, não são esperados acréscimos à complexidade de operação ou gerenciamento da RDC. A implementação da heurística não é complexa, e portanto não acrescenta uma carga computacional relevante à solução do PPRDR.

A seguir, são listados alguns trabalhos futuros que podem complementar os resultados obtidos nesta dissertação:

- **inclusão de restrições de banda de transmissão nos servidores no modelo *offline* para o PACA:** Conforme comentado anteriormente, apesar de não serem esperados grandes alterações nos resultados já obtidos, a inclusões de restrições que mapeiem a limitação de banda de transmissão nos servidores é interessante, até mesmo para confirmar a tese de que os resultados não sofrerão grandes alterações;
- **inclusão de restrições de banda de transmissão nos servidores no modelo *online* para o PACA:** Os resultados para as instâncias da classe D, que possuem maiores restrições de banda de transmissão nos servidores, evidenciam que em abordagens *online* para o PACA é essencial um controle da capacidade de banda de transmissão dos servidores nestes cenários. Como nas instâncias de classe C, que não possuem grandes restrições de banda de transmissão nos servidores, a abordagem *Online Dynamic* obteve os melhores resultados dentre as abordagens simuladas, sendo inclusive próximos dos ótimos, espera-se um ganho significativo de performance desta abordagens para as instância da classe D, após serem implementadas restrições relacionadas com as limitações de banda de transmissão nos servidores da RDC;
- **adaptação dos resultados para resolver o PPS:** Como abordado no Capítulo 2, o PPS consiste em determinar a posição dos servidores da RDC dentre as possíveis localidades, observando a limitação da quantidade de servidores disponível. Desta forma, diferentemente do PACA, os resultado do PPS não determinam a capacidade dos servidores da RDC, apenas a sua localização. Neste contexto, um possível trabalho futuro seria avaliar qual a performance de uma metodologia para resolver o PPS baseada nos resultados do PACA. Uma abordagem inicial para esta metodologia consiste em ordenar os servidores com base em seu espaço de armazenamento determinado pelo PACA, e alocar os servidores nas localidades em que foram alo-

cados maiores espaços de armazenamento, respeitando a quantidade de servidores máxima disponível;

- **geração de novas instâncias de testes:** As instâncias de testes utilizadas neste trabalho apresentam cenários interessantes e por conta disto conclusões sólidas puderam ser tecidas a respeito das metodologias de otimização da alocação do espaço de armazenamento aplicadas. Ainda assim, existe espaço para que novas instâncias de testes sejam geradas, com o objetivo de avaliar o desempenho das metodologias propostas em outros cenários. Um exemplo destes outros cenários seriam instâncias de teste com restrições mais severas do espaço total de armazenamento disponível. Neste contexto, variações de restrições de banda de transmissão dos servidores poderiam ser avaliadas. Outro exemplo seriam instâncias de testes com súbitos incrementos nas taxas de requisições dos usuários por conteúdos, para avaliar qual o comportamento da performance da RDC com o espaço de armazenamento nos servidores alocado conforme as diferentes metodologias para o PACA propostas;
- **aplicação das abordagens de otimização da capacidade de armazenamento desenvolvidas em RDCs reais:** Levando em consideração que, devido às atividades profissionais do autor na empresa Petroleo Brasileiro S.A. (Petrobras), algumas redes de distribuição de conteúdos estão disponíveis para coleta de dados e posteriores modificações, é viável a aplicação dos resultados obtidos nesta dissertação em um cenário real. As redes de distribuição disponíveis possuem características bastante distintas. A primeira consiste em uma RDC que possui o objetivo de distribuir conteúdos multimídia, em sua maioria vídeos em alta resolução, para visualização dos usuários. Nesta RDC, devido ao grande número de conteúdos com tamanho significativo, e com perspectivas futuras de crescimento de uso da RDC, o PACA é relevante já que neste contexto um correto dimensionamento do espaço de armazenamento nos servidores é importante. Além disto, diferentes grupos de usuários e diferentes regiões geográficas possuem taxas de requisição distintas e maior ou menor interesse por conteúdos específicos, o que torna o problema interessante. Já para a segunda RDC disponível, a localização dos servidores é mais importante do que o dimensionamento da sua capacidade de armazenamento. Desta forma, conforme comentado anteriormente, as metodologias aplicadas para o PACA neste dissertação teriam que ser adaptadas para resolver o PPS. Esta segunda RDC tem o objetivo de distribuir imagens de sistemas operacionais para os usuários, assim como pacotes de atualizações periódicos. Desta forma, existe uma baixa variedade de conteúdos na RDC, já que as atualizações periódicas e imagens

de sistema operacionais são praticamente as mesmas para todos os usuários. Por conta disto, apesar destes conteúdos por muitas vezes terem um tamanho bastante elevado, não é necessária grandes preocupações com o espaço de armazenamento dos servidores, pois além de serem poucos conteúdos presentes na RDC, o tempo de vida deles por muitas vezes é curto, já que os pacotes de atualização são substituídos periodicamente.

Referências

- [1] Akamai technologies. <http://www.akamai.com>. 2012.
- [2] Content delivery and the mirror image adaptive cap network. mirror image internet. www.mirror-image.com. 2012.
- [3] Network latency and its effect on video streaming. edge stream. www.edgestream.com. 2012.
- [4] Network latency and its effect on video streaming. limelight networks. www.limelightnetworks.com. 2012.
- [5] C. An e H. Fromm. *Supply Chain Management on Demand: Strategies and Technologies, Applications*. Springer, 2010.
- [6] M. Arlitt e T. Jin. A workload characterization study of the 1998 world cup web site. *Network, IEEE*, 14(3):30–37, may/jun de 2000.
- [7] Dushyant Arora, Anja Feldmann, Gregor Schaffrath e Stefan Schmid. On the benefit of virtualization: Strategies for flexible server allocation. *CoRR*, abs/1011.6594, 2010.
- [8] M. Bjorkqvist, L.Y. Chen e Xi Zhang. Minimizing retrieval cost of multi-layer content distribution systems. Em *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 1–6, june de 2011.
- [9] Ann Chervenak, Ian Foster, Carl Kesselman, Charles Salisbury e Steven Tuecke. The data grid: Towards an architecture for the distributed management and analysis of large scientific datasets. *Journal of Network and Computer Applications*, 23(3):187–200, 2000.
- [10] Daniel M. Lewin F. Thomson Leighton. Global hosting system. US Patent 8073961. 2011.
- [11] G. Fox. Peer-to-peer networks. *Computing in Science Engineering*, 3(3):75–77, mai/jun de 2001.
- [12] Michael J. Freedman, Eric Freudenthal e David Mazières. Democratizing content publication with coral. Em *Proceedings of the 1st conference on Symposium on Networked Systems Design and Implementation - Volume 1, NSDI'04*, pp. 18–18, Berkeley, CA, USA, 2004. USENIX Association.
- [13] Xinjie Guan e Baek-Young Choi. Push or pull?: Toward optimal content delivery. Em *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 1–5, june de 2011.

- [14] Nikolaos Laoutaris, Vassilios Zissimopoulos e Ioannis Stavrakakis. On the optimization of storage capacity allocation for content distribution. *Comput. Netw.*, 47(3):409–428, 2005.
- [15] Bo Li, M.J. Golin, G.F. Italiano, Xin Deng e K. Sohraby. On the optimal placement of web proxies in the internet. Em *INFOCOM '99. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 3, pp. 1282–1290 vol.3, março de 1999.
- [16] Wenzhong Li, Edward Chan, Yilin Wang, Daoxu Chen e Sanglu Lu. Cache placement optimization in hierarchical networks: analysis and performance evaluation. Em *NETWORKING'08: Proceedings of the 7th international IFIP-TC6 networking conference on AdHoc and sensor networks, wireless networks, next generation internet*, pp. 385–396, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer-Verlag.
- [17] Chia-Feng Lin, Muh-Chyi Leu, Chih-Wei Chang e Shyan-Ming Yuan. The study and methods for cloud based cdn. Em *Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC), 2011 International Conference on*, pp. 469–475, oct. de 2011.
- [18] Fernandes N. C. Costa L. H. M. K. Moreira, M. D. D. e O. C. M. B Duarte. Internet do futuro: Um novo horizonte. *Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pp. 1–59, 2006.
- [19] Tiago Araújo Neves, Lúcia Maria de A. Drummond, Luiz Satoru Ochi, Célio Albuquerque e Eduardo Uchoa. Solving replica placement and request distribution in content distribution networks. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 36:89–96, 2010.
- [20] Tiago Araújo Neves. *Redes de Distribuição de Conteúdos: Abordagens Exatas, Heurísticas e Híbridas*. Doutorado em Computação, Instituto de Computação - Universidade Federal Fluminense, 2011.
- [21] Tiago Araújo Neves, Lúcia M. A. Drummond, Luiz S. Ochi, Célio Albuquerque e Eduardo Uchoa. Replicação e distribuição online em redes de distribuição de conteúdos. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2009.
- [22] T. Nguyen, P. Mehra e A. Zakhor. Path diversity and bandwidth allocation for multimedia streaming. Em *Multimedia and Expo, 2003. ICME '03. Proceedings. 2003 International Conference on*, volume 1, pp. I – 1–4 vol.1, july de 2003.
- [23] M. Tamer Ozsu. *Principles of Distributed Database Systems*. Prentice Hall Press, Upper Saddle River, NJ, USA, 3rd edição, 2007.
- [24] Gang Peng. Cdn: Content distribution network. *CoRR*, cs.NI/0411069, 2004.
- [25] Guillaume Pierre e Maarten Van Steen. Globule: A collaborative content delivery network. *IEEE Communications*, 2006.
- [26] Lili Qiu, V.N. Padmanabhan e G.M. Voelker. On the placement of web server replicas. Em *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, 2001.

- [27] Athena Vakali Rajkumar Buyya, Mukaddim Pathan. *Content Delivery Networks*. Springer, 2008.
- [28] Pablo Rodriguez, Christian Spanner e Ernst W. Biersack. Analysis of web caching architectures: hierarchical and distributed caching. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 9(4):404–418, agosto de 2001.
- [29] Aameek Singh, Madhukar Korupolu e Dushmanta Mohapatra. Server-storage virtualization: integration and load balancing in data centers. Em *Proceedings of the 2008 ACM/IEEE conference on Supercomputing, SC '08*, pp. 53:1–53:12, Piscataway, NJ, USA, 2008. IEEE Press.
- [30] Ao-Jan Su, David R. Choffnes, Aleksandar Kuzmanovic e Fabián E. Bustamante. Drafting behind akamai: inferring network conditions based on cdn redirections. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 17(6):1752–1765, dezembro de 2009.
- [31] Célio Albuquerque Tiago Neves, Luiz Satoru Ochi. Synthetic instances for a management problem in content distribution networks. <http://www.labicc.ic.uff.br/conteudo/instance/rprdp/instancesv2.pdf>. 2012.
- [32] D.A. Tran, K.A. Hua e T.T. Do. A peer-to-peer architecture for media streaming. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 22(1):121 – 133, jan. de 2004.
- [33] Felipe Uderman, Tiago Araújo Neves e Célio Albuquerque. Optimizing server storage capacity on content distribution networks. *Symposium on Computer Networks and Distributed Systems (SBRC) - Workshop de Gerência de Recursos e Serviços (WGRS)*, 29:47–60, 2011.
- [34] Limin Wang, Kyoung Soo Park, Ruoming Pang, Vivek Pai e Larry Peterson. Reliability and security in the codeen content distribution network. Em *Proceedings of the annual conference on USENIX Annual Technical Conference, ATEC '04*, pp. 14–14, Berkeley, CA, USA, 2004. USENIX Association.
- [35] Jun Wu e Kaliappa Ravindran. optimization algorithms for proxy server placement in content distribution networks. Em *IM '09: Integrated Network Management-Workshops*, pp. 193–198, New York, NY, USA, 2009.