

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

Departamento de Eletrônica e de Computação

**Um protótipo para distribuição de vídeo sob demanda
baseado em Redes de Distribuição de Conteúdo e Redes
Orientadas a Conteúdo**

Autor:

Felipe Brasil Ramos

Orientador:

Prof. Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte, Dr. Ing.

Examinador:

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa, Dr.

Examinador:

Joao Vitor Torres, M. Sc.

DEL/Poli-PEE/COPPE

Setembro de 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Escola Politécnica - Departamento de Eletrônica e de Computação

Centro de Tecnologia, bloco H, sala H-217, Cidade Universitária

Rio de Janeiro - RJ CEP 21949-900

Este exemplar é de propriedade da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

DEDICATÓRIA

À minha família.

AGRADECIMENTO

Primeiramente gostaria de agradecer à minha família, que sempre me apoiou. Em especial, a meus pais, sempre presentes e preocupados com minha formação, e a meus irmãos.

Agradeço também a meu orientador, Prof. Otto, pelas lições de vida aprendidas e pela orientação nesse trabalho.

Agradeço à UFRJ pelas oportunidades e pela formação de qualidade que me foram oferecidas. Agradeço também à Ecole des Mines de Douai, que contribuiu nessa formação.

Agradeço a meus amigos, que fizeram dessa passagem pela Universidade uma experiência única. Aos de infância, do colégio, aos que conheci na UFRJ ou em Douai.

Também agradeço aos amigos do GTA, pelo apoio e incentivo. Em especial a Igor, Diogo e Lino, que muitas vezes me ajudaram com sua capacidade técnica quando senti dificuldades nesse trabalho, e a Govinda, Alyson, Marcos e Susie, pelo apoio constante.

Agradeço a Paula Guerra, pelo apoio, pelas revisões, pelo carinho. Por estar presente nesse percurso final conturbado.

Agradeço ao CNPq e CAPES pelo financiamento de meus estudos e desse projeto.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram com minha formação.

RESUMO

A Internet revolucionou as telecomunicações e a computação como nada antes visto e hoje faz parte de diversos aspectos de nosso cotidiano. No entanto, vários requisitos de desempenho não são atendidos de forma satisfatória pelo modelo vigente. Dessa maneira, existe uma necessidade real de uma Internet do Futuro. Uma das mais promissoras propostas de Internet do Futuro é o *Content Centric Networking* (CCN), baseado em nomeação de dados. Nele, os usuários não buscam mais se conectar a um *host* a fim de obter determinado conteúdo; eles pedem os dados diretamente à rede. O CCN é eficiente na entrega de conteúdos populares, mas existem severas críticas ao modelo, sobretudo no que diz respeito a sua escalabilidade. As redes de distribuição de conteúdo (*Content Distribution Networks* - CDNs) foram criadas a fim de se resolver problemas de qualidade de serviço e disponibilidade de conteúdos. As CDNs se baseiam no modelo de nomeação de *hosts*. Nesse modelo existe uma necessidade tradução entre “qual conteúdo se busca” e “onde buscá-lo”, o que limita a eficiência da distribuição de conteúdo. A proposta desse trabalho é a criação uma CDN dentro das redes dos provedores de Internet (ISPs) em que se usa CCN para fazer a distribuição de vídeo sob demanda. A utilização do CCN elimina a necessidade de tradução entre “o quê” e “onde”, e com isso aumenta a eficiência das CDNs. Além disso, o CCN está restrito à distribuição de alguns conteúdos e é implementado em apenas alguns roteadores da rede de um ISP, o que evita os problemas de escalabilidade inerentes à arquitetura. Para a avaliação dos resultados foi criada uma rede experimental utilizando o FITS, um testbed interuniversitário. Os resultados foram avaliados comparando o desempenho da distribuição de conteúdo de vídeo via CCN e via IP.

Palavras-Chave: Internet do Futuro, redes orientadas a conteúdo, redes de distribuição de conteúdo, CCN, CDN

ABSTRACT

The Internet revolutionized telecommunications and computing like nothing before and is now part of many aspects of our daily lives. However, the current Internet is not able to meet several performance requirements, such as security and quality of service, and thus, there exists a real need for a Future Internet. One of the most promising proposals of Future Internet is the Content Centric Networking (CCN), based on named data. In CCN, users no longer seek to connect to a host in order to get a content it holds, they ask the network directly for the data. CCN is efficient in delivering popular content, but the CCN model is the object of severe criticisms, especially in what concerns its scalability. The content distribution networks (CDNs) were created in order to solve availability and quality of service problems. The CDNs are based on the host naming paradigm. In this model there is a need for translation between “ what content is sought ” and “ where to get it”, which limits the efficiency of content distribution. The purpose of this work is to create a CDN that uses CCN to distribute video on demand juxtaposed to the networks of Internet service providers (ISPs). The use of CCN eliminates the need to translate between the “ what ” and “ where”, and thus increases the efficiency of CDNs. In addition, the CDN is to be implemented using only a few routers of the ISP network and is restricted to distributing a fixed amount of content, which avoids the scalability problems, which are inherent to the CCN architecture. The results were evaluated by comparing the performance of distributing video content via IP and via CCN in an experimental network nested in the Future Internet Testbed with Security (FITS), an interuniversity testbed for Future Internet proposals.

Key-words: Future Internet, content centric networking, content distribution networks, CCN, CDN

SIGLAS

CCN - *Content Centric Networking*

CCND - *Daemon CCN*

CDN - *Content Distribution Networks*

CS - *Content Store*

DNS - *Domain Name System*

FIB - *Forwarding Information Base*

FITS - *Future Internet Testbed with Security*

GTA - *Grupo de Teleinformática e Automação*

IP - *Internet Protocol*

ISP - *Provedor de Serviços de Internet*

LSA - *Link State Advertisement*

nCDN - *Named Content Distribution Network*

NDN - *Named Data Network*

OLSA - *Opaque Link State Advertisement*

OSPF - *Open Shortest Path First*

OSPFD - *Daemon OSPF*

OSPFN - *OSPF for named data*

PIT - *Pending Interest Table*

P2P - *Peer to Peer*

QoS - Qualidade de Serviço

SP - Provedor de Serviços

TCP - *Transmission Control Protocol*

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

VoD - Vídeo sob Demanda

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Redes Orientadas a Conteúdo e Redes de Dados Nomeados	2
1.2	Redes de Distribuição de Conteúdo	3
1.3	Motivação	4
2	A Rede Orientada a Conteúdo	6
2.1	Modelo de Nós em CCN	8
2.1.1	Mecanismo de encaminhamento de Interesses	10
2.1.2	Mecanismo de encaminhamento de Dados	11
2.2	Transporte de Pacotes	13
2.2.1	Controle de Congestionamento	13
2.2.2	Sequenciamento	14
2.3	Roteamento	15
2.3.1	Roteamento Intra-domínio	16
2.3.2	Roteamento Inter-domínio	20
2.3.3	Redes Sobrepostas	21
2.4	Segurança	22
2.4.1	Gerenciamento da confiança	23
2.4.2	Proteção do conteúdo e privacidade	25
2.4.3	Segurança na rede	25
2.5	O Projeto CCNx [®]	26
2.5.1	O protótipo CCNx	27
2.6	Críticas ao CCN	27
3	Redes de Distribuição de Conteúdo	30

3.1	Arquitetura de uma CDN genérica	31
3.2	Gerenciamento de CDNs	32
3.2.1	Gerenciamento da distribuição de conteúdo	32
3.2.2	Gerenciamento das requisições	36
4	O Sistema Proposto	38
4.1	Trabalhos relacionados	38
4.2	Descrição do sistema proposto	40
5	Implementação e Avaliação de Desempenho	44
5.1	A rede de testes	44
5.2	O ambiente de testes - o FITS	46
5.3	A configuração das máquinas	46
5.4	Os cenários de testes	47
5.5	A avaliação de desempenho	48
6	Conclusão	51
6.1	Trabalhos Futuros	52
	Bibliografia	53

Lista de Figuras

2.1	Comparação entre as arquiteturas da Internet e do CCN. No CCN, o componente universal da rede muda de endereços IP para pedaços de conteúdo nomeado. <i>Adaptado de [1]</i>	8
2.2	Formato dos pacotes do CCN.	9
2.3	Exemplo de Nome CCN. <i>Adaptado de [1]</i>	9
2.4	Modelo de mecanismo de encaminhamento do CCN.	12
2.5	Estrutura interna de CS, PIT e FIB.	12
2.6	Busca na árvore de nomenclatura. A estrutura em árvore facilita a busca por conteúdo.	15
2.7	Sequência temporal das mensagens utilizadas na descoberta de rotas via OSPFN.	17
2.8	Controladores hierárquicos e suas zonas de atuação. Rotas não conhecidas são perguntadas aos controladores de nível hierárquico superior.	19
2.9	Rede mista IP/CCN. A rede CCN está sobreposta à rede IP.	21
2.10	Autenticação de conteúdo em arborescência. O CCN permite associar prefixos a chaves, o que possibilita uma autenticação em cascata. <i>Adaptado de [1]</i>	24
3.1	Estrutura genérica de uma CDN. <i>Adaptado de [2]</i>	31
4.1	Rede de distribuição mista IP/CCN. A rede de distribuição trabalha cooperativamente com as CDNs, distribuindo conteúdo através da rede dos ISPs.	38
5.1	Arquitetura da rede de testes usada: servidor de conteúdo, roteadores NDN atuando como pontos de conversão e consumidores de conteúdo.	45

5.2	Quanto mais próximo ao servidor, menor o consumo de banda na distribuição via CCN relativamente ao consumo de banda na distribuição via IP.	48
5.3	O consumo de banda utilizando CCN é claramente menor quando se agrega o consumo de todos os enlaces.	49
5.4	Tráfego da distribuição de conteúdo para os consumidores. Na extremidade da rede, a distribuição é sempre feita via IP, portanto igual para ambos os experimentos.	50

Capítulo 1

Introdução

A Internet revolucionou as telecomunicações e a computação como nada antes visto. Hoje ela é um meio de disseminação de informação mundial e um meio de colaboração e interação entre indivíduos e seus computadores, independentemente de posicionamento geográfico.

A Internet atual evoluiu a partir de princípios criados nas décadas de 60 e 70. Seu propósito inicial seria compartilhar recursos ao utilizar remotamente uma capacidade de processamento para fazer cálculos [1].

O primeiro esboço de ideias sobre redes de computadores, a chamada “Rede Galáctica” [3], foi proposta por J.C.R. Licklider em 1962. A primeira *Wide Area Network* foi criada em 1965 nos Estados Unidos, conectando um computador em Massachusetts a outro na Califórnia. Logo se constatou que a tecnologia existente - a comutação de circuitos - utilizada no sistema telefônico, não era adequada à transferência de dados, pois implicava numa subutilização da capacidade dos enlaces, e que a comutação de pacotes era uma melhor alternativa. Ainda na década de 60 começaram os estudos sobre a ARPANET, rede pioneira na utilização de comutação de pacotes e precursora da atual Internet. O *Internet Protocol* (IP) surgiu na década de 70 e é a base da Internet atual.

Um grande trajeto foi percorrido desde o conceito da “Rede Galáctica” de J.C.R. Licklider e o que existe atualmente. A Internet evoluiu e hoje suporta uma extensa gama de funções que variam desde compartilhamento de arquivos e acesso remoto

a *login* seguro e compartilhamento de recursos. No entanto, não apenas a Internet evoluiu, mas também seus usuários. Existem vários requisitos de desempenho que não são atendidos de forma satisfatória pelo modelo vigente, tais como qualidade de serviço e segurança, entre outros. Pesquisadores acreditam que a Internet atual não é mais capaz de se adequar às variadas demandas através de modificações incrementais no IP e que existe uma necessidade real de uma Internet do Futuro [4]. Novas propostas que venham a substituí-la devem ser capazes não só de resolver os problemas da Internet atual como aproveitar ao máximo a infraestrutura existente, de modo a reduzir custos. No entanto, uma das ideias-chave que possibilitou a evolução da Internet é a arquitetura aberta. A rede é, portanto, extremamente heterogênea e a criação de modelos eficientes que aproveitem a estrutura presente constitui um desafio de projeto para a Internet do Futuro.

As pesquisas de soluções para a Internet do Futuro seguem duas vertentes: a vertente monista, também chamada clássica, e a vertente pluralista. A vertente monista defende que uma nova pilha de protocolos única deve ser criada a fim de substituir o IP. Segundo essa abordagem, a Internet do Futuro deve se estabelecer a partir desse novo modelo monolítico mais adequado à realidade atual. A vertente pluralista, por outro lado, não defende a substituição do IP por outro modelo monolítico, mas a criação de novas pilhas de protocolos que sejam capazes de satisfazer diferentes requisitos. Nessa abordagem, os roteadores físicos devem ser capazes de executar em paralelo as diferentes pilhas de protocolos, formando redes virtuais, a fim de oferecer serviços diversificados e atender a requisitos específicos.

1.1 Redes Orientadas a Conteúdo e Redes de Dados Nomeados

A Internet atual é baseada no modelo de comunicação fim-a-fim, o que vai de acordo com a ideia inicial sob a qual a Internet foi concebida, de se acessar recursos presentes em uma máquina específica. No entanto, o padrão de uso da Internet não é mais caracterizado por compartilhamento de recursos. A demanda atual é caracterizada por acesso a serviços *online* e busca, produção e distribuição de conteúdo.

À vista disso, a comunicação fim-a-fim perde seu sentido, sendo substituída pela ideia de redes orientadas a conteúdo. Nas redes orientadas a conteúdo, o foco passa a ser o conteúdo que se deseja em vez de ser a máquina final, o hospedeiro, onde se guarda esse conteúdo.

Entre as propostas de redes orientadas a conteúdo, pode-se destacar a Rede Orientada a Conteúdo (*Content Centric Networking* - CCN), apresentada em Jacobson *et al.* [1] e Zhang *et al* [5]. Na CCN, os usuários não buscam mais acessar um determinado hospedeiro a fim de obter conteúdos que ele detém; eles requisitam os dados diretamente à rede e ela os entrega. A proposta defende que, para que essa dinâmica de entrega de conteúdo seja eficiente, a nomeação de hospedeiros, adequada ao modelo de conexão fim-a-fim, deve ser substituída pela nomeação de conteúdo. A nomeação de conteúdo, ou seja, a identificação única cada conteúdo através de um nome, é o que permite buscar diretamente os dados sem que haja necessidade de se conhecer seus hospedeiros. Por esse motivo, a rede CCN é uma rede de dados nomeados.

A ideia de nomeação de conteúdo não é exclusiva da rede CCN. Outras propostas de redes de dados nomeados (*Named Data Networking* - NDN) foram criadas ao longo do tempo, todas apresentando soluções para problemas da Internet atual. Entre elas figuram DONA [6], LIPSIN [7] e TRIAD [8]. Contudo, o CCN é a mais atual delas e desponta como uma das mais promissoras propostas de Internet do Futuro. Além disso, a CCN possui uma implementação experimental que roda sobre IP, o CCNx [9], que foi utilizada na rede de testes implementada nesse trabalho.

1.2 Redes de Distribuição de Conteúdo

As soluções para os problemas da Internet não estão exclusivamente relacionadas à ideia de Internet do Futuro. As redes de distribuição de conteúdo, CDNs, foram criadas a fim de se resolver problemas de qualidade de serviço e disponibilidade de conteúdos.

As CDNs trabalham no sentido de disponibilizar os recursos necessários para se garantir uma boa qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS) continuamente, independentemente de flutuações da demanda ou do estado da rede de distribuição. Normalmente utilizam-se do artifício de disponibilizar servidores próximos aos consumidores contendo réplicas dos conteúdos a serem distribuídos [10]. Esses servidores de réplicas possuem uma interface com a rede dos provedores de Internet (*Internet Service Providers* - ISPs), que são os agentes que efetivamente disponibilizam Internet aos consumidores.

As CDNs utilizam uma variedade de aplicações inteligentes para administrar a distribuição de cópias de conteúdos e podem servir a múltiplos provedores de conteúdo concomitantemente. Assim sendo, existe um mercado de serviços de CDN, pois o compartilhamento de recursos gera economias de escala. Provedores de conteúdo contratam o serviço e cabe ao provedor de serviços (*Service Providers* - SP) garantir os níveis de desempenho contratados.

1.3 Motivação

Em nCDN [11], a performance de uma CDN que utiliza nomeação de conteúdos para a distribuição dos dados foi avaliada e comparada à performance de uma CDN convencional através de uma série de simulações. Os resultados mostram que o uso de dados nomeados em CDNs pode melhorar seu desempenho.

Este trabalho propõe um modelo de rede de distribuição de conteúdo em nível de ISP que utiliza uma rede CCN superposta à rede dos ISPs para distribuir conteúdo de vídeo. O modelo proposto vai de acordo com a proposta de utilização de dados nomeados em CDNs a fim de obter ganhos de desempenho, visto que a rede CCN, utilizada para distribuição de conteúdos, é uma rede de dados nomeados. A rede de distribuição proposta trabalha de forma cooperativa com redes de distribuição de conteúdo que utilizam dados nomeados (nCDNs). Os conteúdos de vídeo disponibilizados pelas nCDNs nas bordas das redes dos ISPs são redistribuídos pela rede de distribuição proposta até as bordas das redes dos ISPs, onde pontos de conversão CCN/IP permitem aos consumidores se conectarem via IP a fim de obter o conteúdo

demandado. Espera-se reduzir a carga na rede dos ISPs ao se utilizar CCN para distribuir conteúdos devido à capacidade do CCN de agregar fluxos de dados. Adicionalmente, espera-se também melhorar a qualidade de serviço de distribuição de vídeo ao se disponibilizar o conteúdo mais próximo dos consumidores.

Para a avaliação de desempenho, foi implementada uma rede de distribuição de conteúdo experimental. Nessa rede, utiliza-se o CCN para gerenciar a distribuição de vídeo sob demanda e o desempenho dessa distribuição é comparado frente ao desempenho de uma distribuição via IP.

Os conceitos básicos desse trabalho, a Rede Orientada a Conteúdo (CCN) e as redes de distribuição de conteúdo são apresentados respectivamente nos Capítulos 2 e 3. O modelo proposto é apresentado no Capítulo 4 e os testes e resultados obtidos são apresentados no Capítulo 5. No capítulo final são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

Capítulo 2

A Rede Orientada a Conteúdo

O paradigma do IP reflete os princípios fundamentais sobre os quais foi desenvolvida a Internet - uma rede de comunicação fim-a-fim entre hospedeiros confiáveis objetivando partilhar recursos. A abstração usada no núcleo da rede, baseada em nomeação de hospedeiros, é adequada para este fim. No entanto, a rede TCP/IP se mostra menos eficiente para atender as necessidades atuais dos consumidores, caracterizadas por acesso a serviços *online* e por busca, produção e distribuição de conteúdo.

O projeto inicial da Internet foi baseado na suposição de que seu principal uso seria conectar hospedeiros. Essa suposição culminou na criação dos endereços IP, utilizados para identificação dos hospedeiros. Para que o endereçamento IP fosse escalável, os endereços foram concebidos de forma hierárquica, de modo que cada rede está dividida em várias sub-redes, interconectadas em um ponto central. Essa necessidade de interconexão de sub-redes em um ponto central relaciona de forma intrínseca a Internet à ideia de localização geográfica. Dessa maneira, ao se utilizar o IP para realizar as tarefas mais demandadas hoje em dia, se faz necessário um mapeamento entre “o que se busca” e “onde buscar”. A disponibilização de um serviço de distribuição de conteúdo eficiente nesses moldes só se faz possível mediante utilização de mecanismos complexos na camada de aplicação e normalmente às custas de elevado uso de banda ou dependentes de redes *ad hoc*, como no caso do *Peer to Peer* (P2P) [6].

O uso de nomes em vez de endereços está entre as soluções adotadas para se contornar esse problema de mapeamento. O DNS (*Domain Name System*), pedra fundamental da Internet atual, baseia-se na nomeação de domínios hierárquicos. No entanto, algumas decisões de projeto cruciais já haviam sido tomadas antes do aparecimento do DNS e outras formas de nomeação; a Internet já estava atrelada ao endereçamento IP e, com isso, o potencial da nomeação foi substancialmente reduzido, visto que deveria se adequar a uma arquitetura já existente e atrelada a localização geográfica. De fato, o papel da nomeação na arquitetura atual é mais um acidente da história que o resultado de um projeto adequado às necessidades atuais [6].

A Rede Orientada a Conteúdo (*Content Centric Networking* - CCN) se apoia em uma arquitetura de redes que busca explorar todo o potencial da nomeação de dados. O CCN foi projetado com o intuito de eliminar a necessidade de tradução entre “o quê” e “onde”. Em sua concepção se buscou guardar os aspectos positivos do IP, como simplicidade, robustez e escalabilidade, ao mesmo tempo em que se criavam soluções para os problemas existentes. Dessa maneira, alguns dos problemas clássicos do IP [4], como a questão da disponibilidade de serviços, da autenticidade dos dados e da dependência de localização são resolvidos no CCN simplesmente porque a arquitetura foi projetada para tal. Além disso, o modelo de nomeação de dados facilita a implementação de algumas dessas soluções ao eliminar a necessidade de mapeamento entre conteúdos e sua localização. Na Figura 2.1 são comparadas as estruturas do CCN e do IP.

É importante se observar que, embora o CCN seja uma proposta para substituir a Internet, existem várias semelhanças estruturais entre as duas arquiteturas, visto que se buscou guardar os aspectos positivos do IP.

No CCN, assim como no IP, a maioria das camadas representa acordos bilaterais, sejam entre links físicos ou entre produtores e consumidores. A única camada que necessita de um acordo universal é a Camada 3, a camada de rede. A necessidade de um acordo universal em somente uma camada é uma das características que permitiram o sucesso do IP, pois é simples e dá flexibilidade para se modificar as

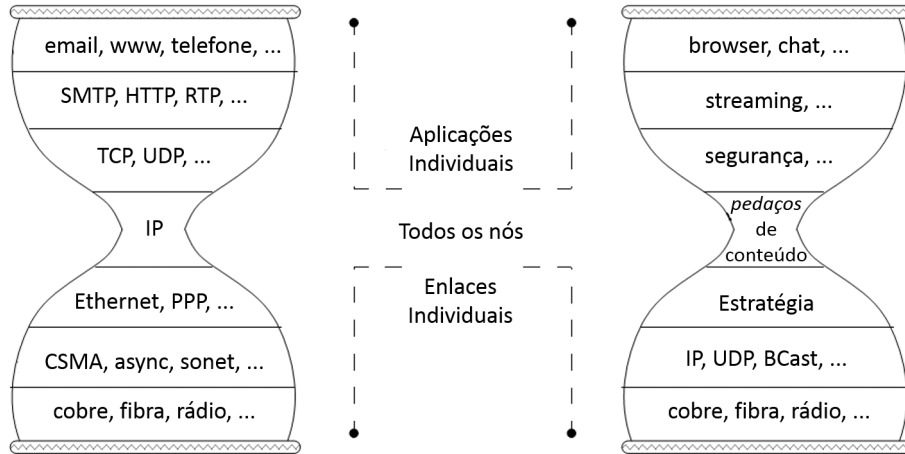


Figura 2.1: Comparação entre as arquiteturas da Internet e do CCN. No CCN, o componente universal da rede muda de endereços IP para pedaços de conteúdo nomeado. *Adaptado de [1].*

outras camadas. No CCN, os pedaços de conteúdo nomeado substituem os endereços IP. Ao mesmo tempo, existe uma relação mais simples com a Camada 2 (enlace), que permite ao CCN explorar ao máximo as vantagens de se ter múltiplas conexões simultâneas. Além disso, CCN pode rodar sobre qualquer substrato, até mesmo o próprio IP.

A estrutura do CCN é apresentada a seguir e ao final deste capítulo é apresentado o Projeto CCNx[®] [9], que disponibiliza uma implementação do CCN, utilizada no desenvolvimento deste projeto de fim de curso.

2.1 Modelo de Nós em CCN

Em CCN, todos os nós podem ser considerados roteadores no sentido em que podem tanto enviar e encaminhar requisições quanto receber e encaminhar conteúdo. Existem apenas dois tipos de pacotes: Interesse e Dados, representados na Figura 5.4. Um pacote de Interesse é enviado sempre que um nó deseja acessar determinado conteúdo. Pacotes de Dados só são transmitidos em resposta a Interesses. A dinâmica do fluxo de informações é regida segundo o envio de Interesses por parte dos consumidores e, portanto, trabalha em fluxo puxado.

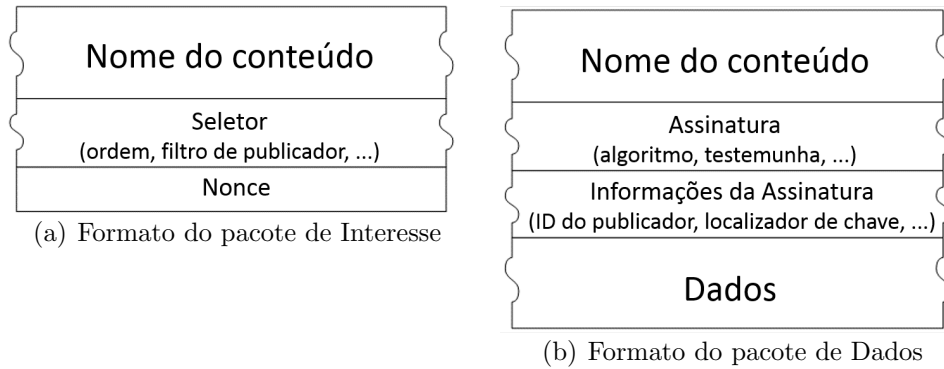


Figura 2.2: Formato dos pacotes do CCN.

Os Nomes CCN, representados na Figura 2.3, são elementos binários opacos, compostos de um número explicitamente especificado de componentes. São tipicamente hierárquicos, formados por uma concatenação de prefixos. Por conveniência de notação, os prefixos são separados pelo caractere “/”. Dessa maneira, podem ser analisados de forma semelhante ao que é feito no IP: um pacote chega numa *face*¹, é feita uma busca pela correspondência de prefixos mais longa² com o Nome do pacote e a partir do resultado dessa busca, uma ação é tomada. As ações podem ser reencaminhar o pacote, respondê-lo ou descartá-lo.

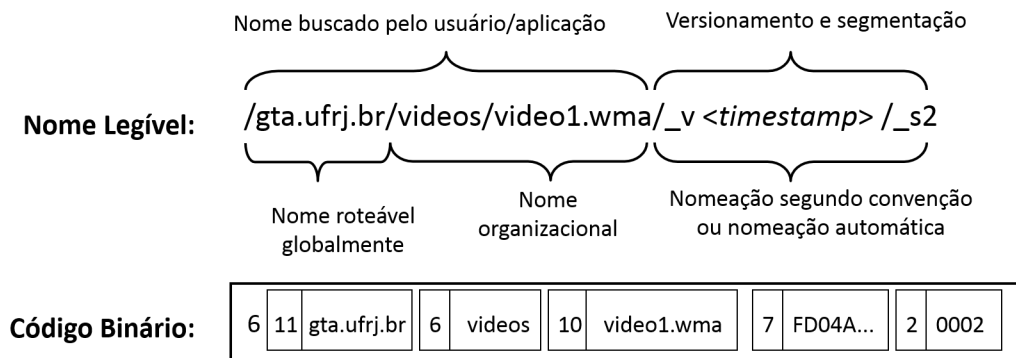


Figura 2.3: Exemplo de Nome CCN. *Adaptado de [1].*

¹Em CCN os roteadores podem receber requisições por diferentes meios, não necessariamente apenas através das interfaces de hardware. O termo *face* é empregado em [1] em detrimento do termo interface a fim de explicitar essa diferença e guardar generalidade.

²A busca por um Nome CCN é sempre feita procurando-se a mais longa correspondência de prefixos com o Nome do pacote. Assim sendo, sempre que “busca no Nome do pacote” for utilizado, leia-se “busca pela maior correspondência de prefixos com o Nome do pacote”.

Existem três estruturas de dados principais que compõem o mecanismo de encaminhamento de pacotes do CCN e participam desse processo decisório: a Base de Informações de Encaminhamento (*Forwarding Information Base* - FIB), o Armazém de Conteúdo (*Content Store* - CS) e a Lista de Interesses Pendentes (*Pending Interest Table* - PIT).

2.1.1 Mecanismo de encaminhamento de Interesses

Quando um Interesse, ou seja, uma solicitação por dados, chega em uma das *faces* de um roteador, é feita uma busca por pacotes que “satisfazam” esse Interesse nas estruturas de dados - CS, PIT e FIB - daquele roteador. No CCN, um pacote de dados satisfaz um pacote de interesse se o Nome do Interesse é um prefixo do Nome do pacote de dados. A busca é feita primeiramente no *Content Store*, depois na PIT e finalmente na FIB.

2.1.1.1 Busca no *Content Store*

Se o pacote de dados requisitado existir no *Content Store*, ele será imediatamente enviado pela *face* pela qual o Interesse chegou e esse Interesse será descartado.

2.1.1.2 Busca na PIT

Se não houver uma correspondência entre o Interesse e os Dados do *Content Store*, a busca será realizada na PIT. Se não existir correspondência entre o Nome do Interesse e as entradas da PIT, o Interesse é enviado à FIB.

Se dentre as entradas da PIT houver alguma que corresponda ao Nome do Interesse recém chegado, é feita uma comparação do *nonce* desse Interesse contra os *nonces* armazenados na PIT. O *nonce* é um número aleatório utilizado como identificador único do pacote. A verificação do *nonce* permite identificar se um pacote de Interesse que chega em um nó constitui a primeira ocorrência do mesmo ou se esse Interesse é apenas uma cópia de um Interesse anteriormente recebido.

Se o *nonce* de um Interesse recém chegado já estiver presente na PIT, o pacote é descartado, pois isso significa que ele é uma cópia de um Interesse já recebido an-

teriormente. Esse mecanismo permite ao CCN fazer encaminhamento de Interesses em *multicast* sem que os pacotes formem um fluxo cíclico.

Caso a correspondência de Nomes exista, mas a correspondência de *nonces* não seja verificada, isso significa que outro Interesse pelo mesmo Dado já foi recebido, não foi satisfeito, e foi reenviado a outros roteadores. Nesse caso, *face* de entrada do Interesse recém chegado é adicionada à Lista de Faces Demandantes, seu *nonce* é armazenado e o pacote de Interesse é descartado. Esse mecanismo permite que o envio de Interesses seja agregado e que novas demandas pelo mesmo Dado não sejam reencaminhadas sem necessidade a roteadores que já as receberam.

2.1.1.3 Busca na FIB

Quando um Interesse chega à FIB, uma nova busca pelo seu Nome é feita. Caso seja encontrada uma correspondência, isso significa que o roteador tem conhecimento de onde o Dado buscado pode estar armazenado. O Interesse é, então, enviado em busca dos Dados. A *face* por onde ele chegou é removida da FIB (pois, obviamente, aquela *face* não possui Dados que o satisfaçam) e ele é enviado às *faces* restantes segundo uma estratégia de encaminhamento pré-definida. A seguir, uma nova entrada é adicionada à PIT, contendo o Nome do Interesse, sua *face* de chegada e seu *nonce*.

Se o Interesse não corresponder a nenhuma entrada do *Content Store*, PIT ou FIB, ele é simplesmente descartado, visto que o nó de chegada não possui Dados que o satisfaçam e não sabe onde encontrá-los.

2.1.2 Mecanismo de encaminhamento de Dados

O encaminhamento de pacotes de Dados é mais simples, pois é passivo: apenas segue, no sentido contrário, o caminho do Interesse. Quando um Dado chega em uma *face*, é feita uma busca por seu Nome. Caso o Nome já exista no CS ou na FIB, ele é descartado, pois é, respectivamente, uma cópia de Dado já armazenada naquele roteador ou um Dado não solicitado. Caso o Nome esteja presente na PIT, o Dado é reenviado a todas as *faces* da sua Lista de Faces Demandantes, menos a *face* de

chegada e a entrada é removida da PIT, visto que os Interesses foram satisfeitos. O Dado é, então, opcionalmente validado e é armazenado no *Content Store*.

Na Figura 2.4 é mostrado um esquema do sistema de encaminhamento de pacotes do CCN e na figura 2.5 são esboçadas as estruturas internas de CS, PIT e FIB.

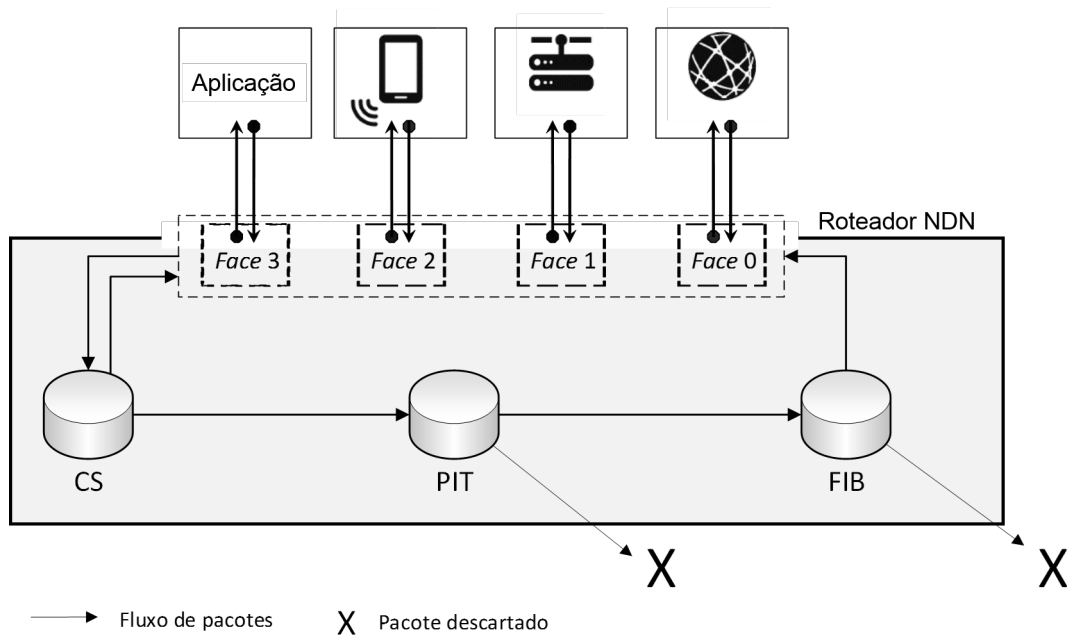


Figura 2.4: Modelo de mecanismo de encaminhamento do CCN.

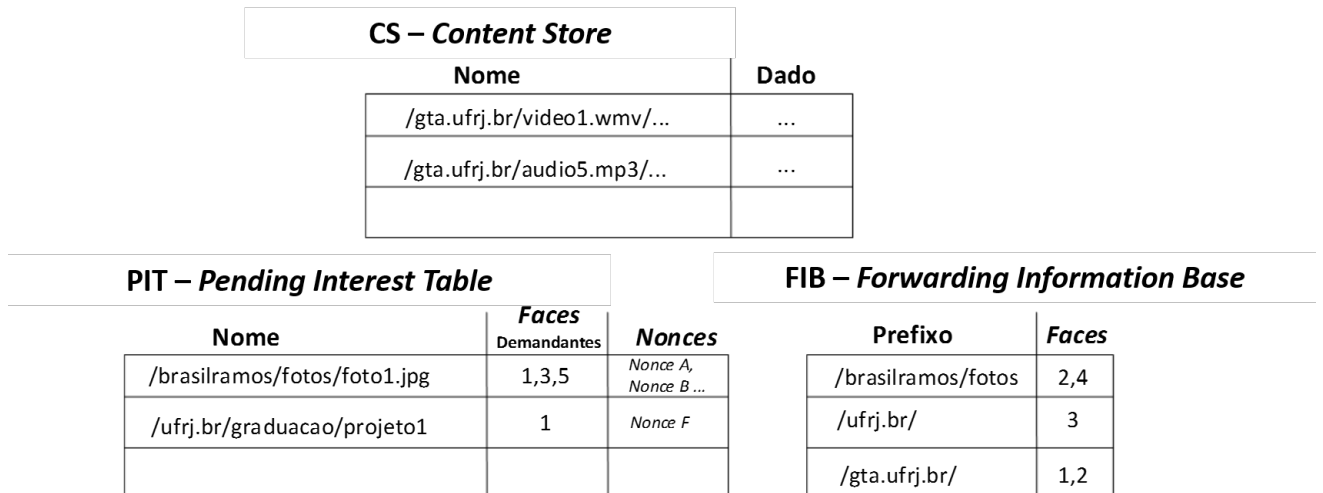


Figura 2.5: Estrutura interna de CS, PIT e FIB.

2.2 Transporte de Pacotes

O CCN foi desenvolvido para substituir a Internet atual. Por esse motivo, à semelhança da pilha de protocolos TCP/IP, deve ser capaz de operar em ambientes em que a confiabilidade da entrega de pacotes é reduzida. Na Internet, os pacotes podem ser danificados ou se perderem no caminho. Como um Dado só é enviado em resposta a um Interesse, cabe ao usuário final - aquele que enviou o primeiro Interesse - reenviar Interesses caso não receba os Dados requisitados.

2.2.1 Controle de Congestionamento

A decisão de reenviar um Interesse e para quais *faces* enviá-lo depende do esquema de encaminhamento de pacotes utilizado. As decisões são tomadas baseadas em informações sobre o tempo de resposta dos nós subsequentes em cada uma das *faces*, *timeout* para os Interesses armazenados na PIT, o número de Interesses não satisfeitos e suas prioridades, entre outras.

A reemissão de Interesses por múltiplos caminhos poderia acabar por gerar um fluxo cíclico de envio de Interesses em uma determinada rede. Entretanto, conforme explicado na Seção 2.1.1.2, esse comportamento é evitado pela presença do *nonce* nos pacotes de Interesse.

A propriedade do CCN de só enviar um Dado em resposta a um Interesse também proporciona, ao mesmo tempo, um controle de fluxo e um controle de congestionamento. Para cada Interesse enviado por uma *face*, haverá no máximo um Dado recebido em resposta através daquela *face*. Como o fluxo é puxado, ou seja, enviado sob demanda, ao controlar a taxa de envio de Interesses, os nós CCN garantem um controle de fluxo contínuo ponto a ponto. Isso colabora para prevenir congestionamentos de rede e é bastante simples, se comparado com os mecanismos hoje utilizados para este fim, como a variação dinâmica dos *window advertisements* utilizada no TCP.

De fato, o CCN possui, inerentes à sua concepção, mecanismos equivalentes a alguns mecanismos do TCP/IP. A velocidade de reemissão de Interesses, por exemplo,

faria o papel das janelas de anúncio do TCP/IP³, enquanto que a dinâmica de um Dado somente ser enviado em resposta a um Interesse equivaleria ao TCP SACK⁴, sendo que os próprios Dados fariam o papel de ACK. Se um Dado não é recebido, o Interesse correspondente é reenviado.

2.2.2 Sequenciamento

A natureza dos nomes CCN permite um sequenciamento lógico dos pedaços de conteúdo e uma independência entre envio de Interesses e Dados. Isso, aliado aos mecanismos de controle de fluxo ponto a ponto e de verificação de recebimento de dados, o tornam ideal para aplicações como transmissão contínua (*streaming*) de vídeo, por exemplo. Conforme explicado na Seção 2.1, os Nomes são organizados de forma hierárquica e são formados por uma série de prefixos. Embora a camada de Transporte não faça restrições com respeito ao sentido dos Nomes, apenas à sua sintaxe, a semântica do Nome é exigida em camadas superiores a fim de permitir uma compreensão por parte dos usuários. No exemplo dado na Figura 2.3, percebe-se claramente que há um sequenciamento dos Nomes, visto que existe uma componente de “versionamento e segmentação”.

Essa componente, aliada a convenções de nomenclatura e regras de busca em nível de aplicação permitem uma busca eficiente por conteúdo a partir de um Nome conhecido. Novos Interesses podem ser gerados utilizando-se esses artifícios, até mesmo para conteúdos ainda não produzidos, como no caso de transmissão de vídeo ao vivo.

Uma aplicação pode, por exemplo, buscar a versão mais recente do vídeo mostrado na Figura 2.3 utilizando-se de seu Nome */gta.ufrj.br/videos/video2.wma* e do

³Em uma comunicação TCP/IP são utilizadas janelas deslizantes para limitar a taxa de envio de pacotes do remetente a fim de evitar congestionamentos na rede.

⁴Em uma comunicação TCP/IP, cada pacote enviado possui um número de série. Quando um pacote é recebido pelo destinatário, este envia uma confirmação de recebimento (*Acknowledgement* - ACK) ao remetente do pacote. O TCP SACK (*TCP Selective ACK*) é um mecanismo que permite confirmar o recebimento de blocos de pacotes que chegaram fora de ordem.

comando *RightmostChild* (busca pelo “ramo filho mais à direita”)⁵. Da mesma forma, pode-se expressar Interesse pelo primeiro segmento que compõe essa versão através do comando *LeftmostChild* (busca pelo “ramo filho mais à esquerda”). O *pipelining* de Interesses pelos segmentos subsequentes pode ser feito utilizando-se o próprio sequenciamento dos nomes (*_s1*, *_s2*, *_s3* ...) ou através de outras regras de busca, como *LeftmostRightSibling* (busca pelo “ramo irmão à direita que está mais à esquerda”), como mostrado na Figura 2.6. Essa variedade de regras de busca permite um gerenciamento eficiente das transferências de conteúdo e dá flexibilidade às aplicações utilizando CCN, que podem se servir de várias estratégias para acessar um conteúdo específico.

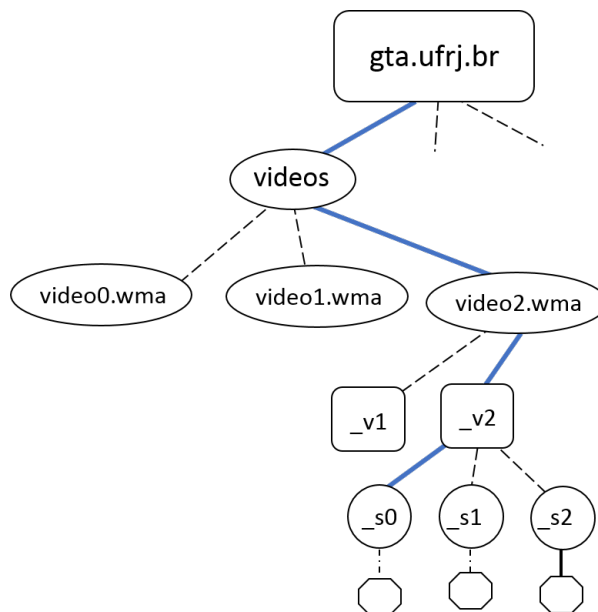


Figura 2.6: Busca na árvore de nomenclatura. A estrutura em árvore facilita a busca por conteúdo.

2.3 Roteamento

O CCN, por sua arquitetura, pode rodar sobre IP de forma transparente. Por esse motivo, muitas propostas de esquemas de roteamento para o CCN existentes

⁵Considera-se que a ordenação padrão na árvore de nomenclatura é feita de cima para baixo e da esquerda para a direita. Dessa maneira, procurar pelo “ramo filho mais à direita” seria o mesmo que procurar pelo “ramo filho mais recente”.

foram projetadas para permitir uma implementação incremental do CCN. Além disso, como visto na seção anterior, o sistema de encaminhamento de pacotes do CCN é menos restrito que o do IP, notadamente no que diz respeito a múltiplas fontes e consumidores de conteúdo. O menor número de restrições permite que os principais mecanismos de roteamento utilizados atualmente possam ser adaptados para o CCN de forma razoavelmente simples.

2.3.1 Roteamento Intra-domínio

Em termos de roteamento intra-domínio, os protocolos OSPF (*Open Shortest Path First*) e IS-IS (*Intermediate System to Intermediate System*), largamente utilizados em redes IP, podem expressar recursos utilizando-se de um “etiquetamento genérico”, o que os torna adequados tanto para endereços IP quanto para Nomes CCN. A detecção automática de roteadores CCN já é possível utilizando-se uma derivação do OSPF, o OSPFN [12] (*OSPF for named data*), um protocolo OSPF para dados nomeados, apresentado a seguir.

As soluções para essa questão não se restringem, no entanto, a adaptações de mecanismos utilizados no IP. Existem propostas unicamente desenvolvidas para o CCN, baseadas, por exemplo, em controladores hierárquicos [13].

O OSPFN

O protocolo OSPF possibilita que cada roteador encontre de forma autônoma as melhores rotas para um determinado destino a partir de mecanismos de inundação (*flooding*) do estado de cada enlace e um algoritmo de busca de melhor caminho⁶. No OSPF, cada roteador captura o estado de cada enlace na rede e os reenvia a todas as interfaces conectadas, na forma de *Link State Advertisements* (LSAs). Os LSAs são adicionados a uma base de dados, a *Link State Database* (LSDB). Cada roteador possui uma cópia da LSDB e a partir das informações nela contidas é capaz de escolher a melhor rota para um determinado destino. Caso haja alguma mudança na rede, a tabela de roteamento é recalculada.

⁶Algoritmo de Dijkstra, ou algoritmo *Shortest Path First* (SPF) - daí o nome do protocolo.

De forma semelhante, o OSPFN utiliza inundação de *Opaque* LSAs (OLSA) para encontrar roteadores NDN adjacentes. OLSAs são LSAs padrão que têm um campo a ser preenchido por uma aplicação adicionado a seus cabeçalhos. Os OLSAs foram criados com o intuito de possibilitar extensão das funcionalidades do OSPF e são encaminhados pelos nós da rede como LSAs padrão, mas só são reconhecidos por nós rodando a aplicação a que se destinam.

Quando se utiliza OSPFN, cada roteador NDN deve rodar um *Daemon* CCN (CCND), o OSPFN e um *Daemon* OSPF (OSPFD) em paralelo. O OSPFN em cada roteador CCN cria OLSAs para anunciar cada Nome que possui e os envia ao OSPFD para que ele os publique. Quando um OLSA advindo de um roteador vizinho é recebido, o OSPFN pergunta ao OSPFD o próximo nó do caminho até o roteador detentor do conteúdo. Quando o OSPFN recebe as informações de rota e custo, ele atualiza sua lista de rotas e as adiciona à FIB do *Daemon* CCN do roteador (CCND), que é o responsável pelo envio de mensagens de Interesse e Dados. A Figura 2.7 ilustra o processo de busca de rotas.

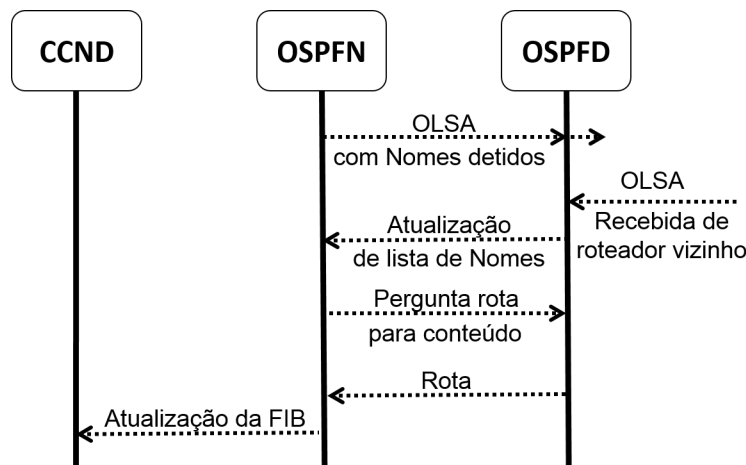


Figura 2.7: Sequência temporal das mensagens utilizadas na descoberta de rotas via OSPFN.

Apesar de automatizado, esse processo utiliza o OSPFD para encontrar as rotas entre os nós NDN. Dessa maneira, somente a melhor rota⁷ para cada nó CCN é

⁷O OSPFD retorna unicamente o endereço do próximo nó da rota menos custosa para o próximo destino, exceto no caso de existirem múltiplas rotas menos custosas.

utilizada, o que nega uma das principais vantagens do CCN: o uso da multiplicidade de caminhos. O ideal seria adaptar o OSPF para encontrar múltiplas rotas ou modificar o OSPFN para que ele encontre as múltiplas rotas. No entanto, os desenvolvedores do protocolo OSPFN alegam que a implementação de quaisquer dessas soluções levaria um certo tempo e por esse motivo implementaram uma solução a curto prazo alternativa: a possibilidade de se configurar manualmente uma lista de próximos nós para cada roteador NDN e suas respectivas prioridades. Caso essa lista de próximos saltos alternativa seja configurada, o OSPFN adiciona essas entradas à FIB de cada prefixo publicado de modo que a ordem de envio de Interesses é dada pela sequência de caminhos menos custosos calculada pelo OSPFD e após isso pelos caminhos alternativos, em ordem de preferência.

Roteamento utilizando Controladores Hierárquicos

Os prefixos CCN possuem tamanhos variáveis e seu armazenamento necessita mais recursos que o armazenamento de prefixos IP. Além disso, a replicação de conteúdo pela rede de forma dinâmica faz com que as tabelas de roteamento tenham que ser constantemente atualizadas. Propostas como o OSPFN, que utiliza disseminação e agregação de prefixos para construir suas tabelas de roteamento, são sensíveis à quantidade de prefixos não agregáveis e à constante replicação de conteúdos pela rede. Nesse tipo de solução, cada nó deve possuir informações sobre todos os outros nós da rede a fim de calcular as melhores rotas para cada conteúdo. Esse cálculo é feito a partir de imensas tabelas de roteamento e para tal se exige um uso de memória e processamento nos roteadores. Isso compromete a escalabilidade desse tipo de solução, pois, quanto maior a rede, maior o tráfego de mensagens de controle e maior o tamanho das tabelas de roteamento, o que implica um uso excessivo de recursos.

O Grupo de Teleinformática e Automação (GTA) desenvolve uma solução que visa resolver esse problema de escalabilidade. A solução, proposta por de Torres *et al.*, se baseia na separação entre os planos de controle e dados e na utilização de controladores hierárquicos a fim de garantir uma melhor utilização de recursos.

No esquema de roteamento proposto, a rede é dividida em zonas. As zonas são compostas por roteadores, cada qual com seu ID, um nó controlador, responsável por calcular e instalar as rotas internas àquela zona, e nós DHT [14], utilizados para armazenar a localização dos conteúdos alcançáveis naquele nível hierárquico.

Controladores de níveis hierárquicos mais altos são consultados para o cálculo de rotas entre diferentes zonas. Eles também se comunicam, indicando quais são os nós DHT do nível hierárquico mais alto, formando uma DHT única. Os nós DHT de nível hierárquico mais alto são consultados caso a DHT do nível hierárquico inferior não consiga apontar a localização de determinado conteúdo.

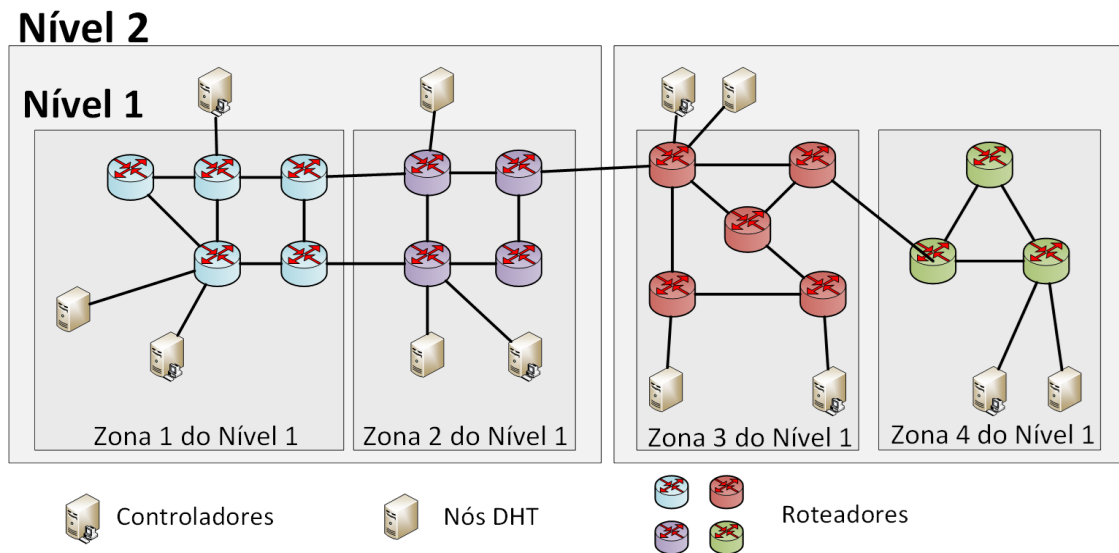


Figura 2.8: Controladores hierárquicos e suas zonas de atuação. Rotas não conhecidas são perguntadas aos controladores de nível hierárquico superior.

Esse esquema de roteamento baseado em controladores hierárquicos é capaz de criar entradas nas FIBs dos roteadores e calcular de forma autônoma rotas até os destinos desejados. Para tal, utiliza apenas mensagens de Dados e Interesse modificadas.

Inicialmente, os roteadores inundam a rede com mensagens de Interesse modificadas a fim de conhecer seus vizinhos e o controlador mais próximo. Depois disso, os roteadores se registram no controlador e posteriormente registram seus conteúdos. Quando algum roteador quer acessar um conteúdo cujo paradeiro desconhece, ele

manda uma mensagem ao controlador perguntando pelo destino procurado. O controlador, então, responde com a rota (e rotas alternativas) em um pacote de Dados. O roteador a interpreta e instala uma rota até o destino utilizando um Interesse com semântica estendida. A rota pode ser simplesmente instalada, para uso posterior, ou instalada junto com o envio de Interesse por um Dado. A instalação de novas rotas é, portanto, dinâmica, mas sob demanda. A remoção de rotas⁸ também ocorre sob demanda, através do envio de um pacote de Interesse modificado.

Essa dinâmica de modificação de rotas sob demanda regida por pacotes de Interesse e Dados dá flexibilidade ao sistema, pois permite que ele se adapte a mudanças, ao mesmo tempo que evita uma sobrecarga da rede com mensagens de controle. Ela é muito menos custosa se comparada, por exemplo, à dinâmica do OSPFN, que utiliza mensagens de controle dedicadas (OLSAs) e periódicas para atualizar seu plano de controle. Apesar de mais eficiente, ainda não existem resultados que demonstrem o quão escalável é a solução.

2.3.2 Roteamento Inter-domínio

Soluções de roteamento semelhantes às apresentadas para roteamento intra-domínio podem ser utilizadas para roteamento inter-domínios. O atual esquema de roteamento utilizando BGP pode ser adaptado para se usar nomes, visto que o BGP possui um equivalente ao etiquetamento dos protocolos OSPF e IS-IS. O mecanismo de encaminhamento AS-path (*Autonomous System path*) do BGP pode ser adaptado a fim de permitir a cada domínio mapear a topologia da rede a nível de prefixo de domínio, em vez de a nível de prefixos de conteúdo. Dessa maneira, os roteadores NDN poderiam descobrir quais prefixos são disponibilizados por cada domínio através do AS-path e em seguida encaminhar os Interesses para os respectivos destinos.

Outra solução é a adaptação de mecanismos de DNS de modo que se possa procurar o endereço IP de servidores de conteúdo localizados em domínios diferentes

⁸Pode-se desejar remover uma rota no caso de um roteador/provedor de conteúdo sair da rede ou no caso de falha na obtenção de conteúdos a partir de uma rota.

de onde o consumidor se encontra. Um tunelamento via UDP automatizado conectando roteadores NDN dos diferentes domínios permitiria acesso bilateral aos conteúdos. Essa solução, no entanto, não pode ser implementada de forma automatizada no caso de dois domínios NDN separados por ISPs que não possuam suporte a NDN, pois não existe um mecanismo que permita atravessar a rede dos ISPs que não possuem suporte a NDN a fim de descobrir os conteúdos nomeados existentes nas redes de outros ISPs [1].

2.3.3 Redes Sobrepostas

A Rede Orientada a Conteúdo constrói dinamicamente topologias que são próximas do ótimo em termo de consumo de banda e atraso, pois os Dados só seguem o caminho dos Interesses. Essa dinâmica garante que no máximo uma cópia de cada conteúdo é transportada e o caminho utilizado é sempre o menor ou mais rápido [1]. É possível se implementar uma rede CCN sobre uma rede IP de forma transparente ao se substituir roteadores IP por roteadores NDN. Uma implementação como tal guarda vantagens sobre uma rede puramente IP no que diz respeito à distribuição de conteúdos. A figura 2.9 ilustra uma rede CCN sobreposta a uma rede IP.

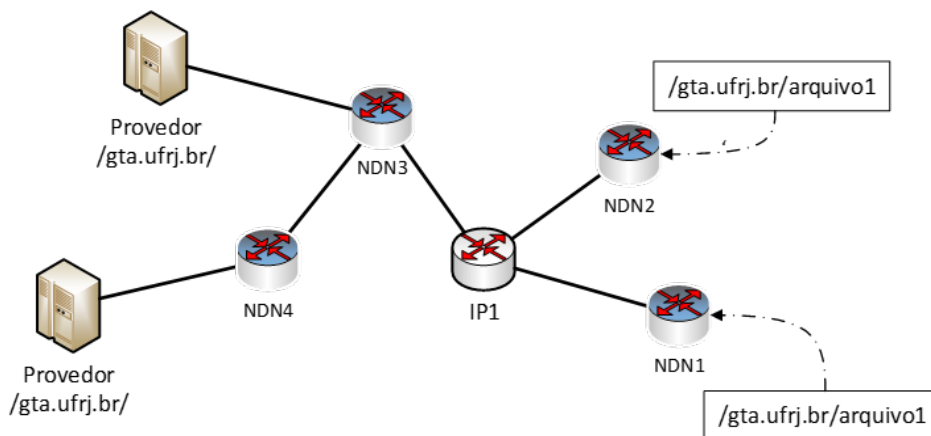


Figura 2.9: Rede mista IP/CCN. A rede CCN está sobreposta à rede IP.

No exemplo mostrado, os roteadores NDN1, NDN2, NDN3 e NDN4 são roteadores CCN, enquanto que o roteador IP1 é um roteador IP. Considera-se que há entradas nas FIBs de todos os roteadores NDN relativas ao prefixo */gta.ufrj.br/*. Isto posto, um cliente adjacente a NDN2 que busque o conteúdo */gta.ufrj.br/arquivo1* encaminhará Interesses para NDN3, que encaminhará Interesses para o provedor

adjacente a ele e a NDN4. Quando o primeiro pacote de Dados que satisfaça o Interesse chegar a NDN3, chegue ele a partir do repositório adjacente ou a partir de NDN4, ele será armazenado no CS de NDN3 e enviado a NDN2. O segundo pacote de Dados que chegar será descartado. Caso NDN1 deseje receber o mesmo arquivo, um Interesse será encaminhado a NDN3, que enviará o Dado que o satisfaz diretamente, pois este já se encontra em seu CS.

Essa configuração não é ótima, pois os Interesses correspondentes ao mesmo Dado cruzam o *link* IP1-NDN3 duas vezes. O mesmo ocorre com o pacote de Dados. Essa duplicação de tráfego está relacionada ao fato de o roteador IP1, que não é um roteador NDN, mediar a transferência.

O problema é resolvido simplesmente pela substituição do roteador IP1 por um roteador NDN. Como o CCN está rodando sobre IP e por isso é capaz de rotear qualquer conteúdo via IP, a modificação é transparente para a rede. Essa modificação otimiza a entrega de conteúdo e permite economias de banda. Isso cria um incentivo para os ISPs aumentarem a rede NDN de forma incremental. Uma vez tendo instalado alguns roteadores NDN em sua rede, a troca de outros roteadores IP por roteadores NDN a fim de potencializa os ganhos.

2.4 Segurança

No CCN, a segurança da informação deixa de ser garantida via um canal seguro fim-a-fim e passa a ser garantida em cada pedaço de conteúdo. Por esse motivo, as assinaturas dos Dados são obrigatórias. Embora os mecanismos de assinatura possam ser negociáveis, e uma aplicação possa mesmo escolher não verificar as assinaturas dos pacotes, ou verificá-las parcialmente, as aplicações (ou roteadores) não podem escolher receber Dados não assinados. Comparando-se as assinaturas com as informações sobre o provedor de conteúdo pode-se verificar a autenticidade dos Dados, o que por sua vez permite o desacoplamento entre onde se obtém o Dado e sua origem, isto é, a conexão direta ao provedor de dados não é mais necessária para garantia de autenticidade.

Os dados CCN são publicamente autenticáveis, ou seja, as assinaturas de cada pacote são chaves públicas padrão, que podem ser autenticadas por cada nó, não

só as extremidades de uma conexão. Os pacotes são projetados para ser individualmente autenticáveis, mas nada impede o uso de técnicas de agregação de assinaturas, como Merkle Hash Trees [15] a fim de amortizar o custo computacional da geração de assinaturas individuais.

Cada pacote de Dados contém a informação necessária para se recuperar a chave pública a ser utilizada para sua autenticação. Essas informações incluem seu publicador, assim como o *cryptographic digest* ou a impressão digital (*fingerprint*) daquela chave pública, a fim de que ela possa ser verificada. Também é incluído um localizador para a chave, que pode ser a própria chave ou um Nome CCN que se refira a ela, a fim de que esta possa ser rapidamente recuperada caso se deseje verificar os Dados.

A segurança nos Dados permite evitar certos tipos de ataques. Nas camadas mais baixas do CCN, por exemplo, é feita uma validação puramente sintática: se verifica apenas que, de fato, o dado foi assinado pela chave pública cujo localizador ele carrega. Essa verificação já é suficiente para se evitar alguns ataques em que se altera informação dentro dos pacotes, embora seja simples e não garanta que se deve confiar no conteúdo do Dado em questão. Essa simples verificação de segurança, além de proteger contra ataques, também permite ao usuário filtrar conteúdos por publicador, uma vez de posse da correspondente chave pública, o que garante a segurança dos dados recebidos e reduz ainda mais os riscos de ataques.

2.4.1 Gerenciamento da confiança

O fato de todos os Dados possuírem autenticação não garante que se possa confiar em todo conteúdo recebido. Em CCN, cabe ao consumidor definir se os Dados recebidos são confiáveis. A noção de confiança é contextual, ou seja, para cada tipo de dado, um consumidor pode definir qual é o limiar que determina a confiabilidade do conteúdo. Pode-se determinar, por exemplo, que um blog pode ter certificado próprio e que qualquer dado daquele blog é confiável desde que tenha a assinatura correspondente ao certificado, enquanto que uma edição de um Jornal só é considerada confiável caso sua assinatura seja verificada com uma infraestrutura de chaves

públicas (*Public Key Infrastructure* - PKI).

O fato de um Nome estar atrelado a uma assinatura também permite ao CCN gerar conteúdo autocertificável. Se um Nome se refere a uma organização e o conteúdo do pacote de dados referente àquele Nome é uma chave pública, o resultado é um certificado digital. Como Nomes CCN têm característica hierárquica, o gerenciamento de chaves pode ser feito também hierarquicamente. Dessa maneira, um pequeno contingente de Nomes poderia assinar digitalmente uma infinidade de conteúdos diferentes, o que, de certa forma, desatrela as assinaturas da figura das Entidades Certificadoras.

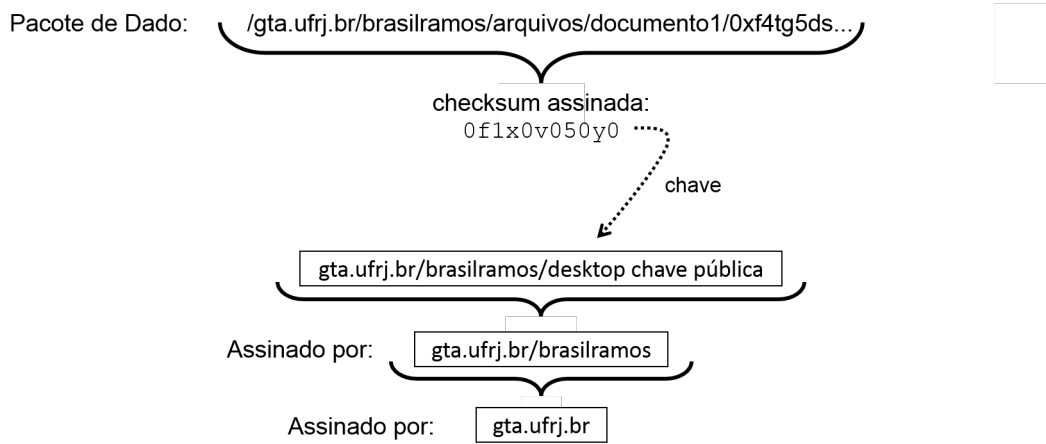


Figura 2.10: Autenticação de conteúdo em arborescência. O CCN permite associar prefixos a chaves, o que possibilita uma autenticação em cascata. *Adaptado de* [1].

A liberdade de se definir quando um dado é confiável, aliada ao fato de os nomes e conteúdos serem autocertificáveis, dá ao CCN bastante liberdade quanto ao modelo utilizado para se gerenciar a confiança. Ao mesmo tempo que se podem utilizar mecanismos padrão de certificação digital, como PKI ou Teia de Confiança (*Web of Trust*), visto que as chaves podem ser distribuídas em pacotes de Dados como conteúdo CCN padrão, novos mecanismos de confiança também podem ser desenvolvidos, pois cabe ao usuário definir em quê confiar e porquê.

2.4.2 Proteção do conteúdo e privacidade

O modelo de dados nomeados já permite um desacoplamento entre conteúdo e localização geográfica. Além disso, o modelo de encaminhamento do CCN apenas reenvia Dados pelas *faces* por onde um Interesse chegou. Dessa maneira, embora o conteúdo seja nomeado, apenas o roteador mais próximo ao usuário final poderia acessar o Nome do que esse usuário consome, uma vez fazendo a correlação entre ele e a *face* a que se conecta.

Caso isso não seja considerado suficiente para garantir a privacidade, os Dados podem ser criptografados. Não existem restrições ao uso de criptografia nos pacotes CCN. Até mesmo os Nomes podem ser criptografados, o que pode ser utilizado, por exemplo, para evitar censura pela filtragem e remoção de Dados que possuam determinado prefixo. Isso é transparente para a rede, visto que os Nomes são apenas componentes binários. O roteamento e sequenciamento eficiente de alguns tipos de dado pode, no entanto, ser prejudicado caso algumas convenções de nomenclatura não sejam respeitadas.

A figura de servidores confiáveis que gerenciam a distribuição de conteúdo restrito não existe em CCN. Pelo fato de todo Dado ser assinado, a criptografia é facilitada. Apenas usuários autorizados teriam acesso às chaves para descriptografar o conteúdo protegido. Os modelos de verificação de usuário também não são definidos e devem ser implementados em nível de aplicação.

2.4.3 Segurança na rede

O fato de todos os Dados serem autenticados dificulta uma série de ataques, pois faz com que Dados alterados sejam facilmente detectados e descartados. A mecânica de encaminhamento do CCN também dificulta ataques, especialmente de DoS, pois há uma agregação dos Interesses enviados e o fluxo de Dados depende exclusivamente do envio de Interesses. Além disso, pelo fluxo ser controlado pelos consumidores, não existe a possibilidade de se enviar Dados maliciosos; pode-se apenas responder a Interesses, mas como dito antes, alterações nos Dados são facilmente detectadas e existe a possibilidade de se filtrar conteúdo por publicador (através do uso das

chaves públicas) e de se usar bibliotecas para identificar tais chaves.

Uma ameaça potencial seria uma inundação de Interesses com prefixos variados (Interesses com Nomes iguais são agregados e apenas afetariam um enlace). Esses Interesses, no entanto, muito provavelmente seriam randômicos e não gerariam resposta (Dados). Ainda assim, simples mecanismos de controle de fluxo (como o envio de Interesses NACK) seriam capazes de controlar esse comportamento ou ao menos detectar o ataque rapidamente.

Embora muito eficiente contra ataques clássicos, o CCN também possui suas vulnerabilidades [16]. Ataques como o *cache snooping*, ataque em que se viola a privacidade dos usuários ao se adquirir informações sobre o *cache* da rede, ou poluição de *cache*, em que se inunda o *cache* com conteúdo indesejado (*spam*) representam ameaças muito maiores numa rede CCN, visto que o todos os nós armazenam conteúdo. Além disso, novos ataques adaptados ao CCN surgirão e as soluções para se proteger desses ataques devem ser desenvolvidas o quanto antes.

2.5 O Projeto CCNx[®]

O Projeto CCNx[®] [9] é um projeto *Open Source* criado e patrocinado pelo Centro de Pesquisa de Palo Alto (*Palo Alto Research Center - PARC*), da Xerox, para o desenvolvimento da arquitetura CCN. Seu objetivo é criar especificações abertas de protocolo, bem como uma implementação-referência desses protocolos.

O projeto desenvolveu uma implementação da arquitetura CCN, o CCNx, que roda sobre IP, a fim de avaliar, testar e desenvolver o CCN. Existe uma extensa comunidade trabalhando em torno do CCNx e da Rede Orientada a Conteúdo, incluindo importantes organizações, como France Telecom e Bell Labs, além da própria Xerox, que mantém o Centro de Pesquisa de Palo Alto. Dentre os projetos patrocinados, podemos destacar o Projeto NDN [17] e o projeto CONNECT [18].

O Projeto NDN é patrocinado pela agência americana NSF⁹ através do projeto FIA [19] - *Future Internet Architecture*, por ser considerado um dos quatro melhores projetos de Internet do Futuro existentes. Já o projeto CONNECT é uma parceria entre empresas e Universidades europeias, dentre as quais podemos destacar Bell Labs, Telecom Paristech, Orange Labs - France Telecom, entre outras.

2.5.1 O protótipo CCNx

O CCNx é a implementação da arquitetura CCN criada pelo PARC para se demonstrar os princípios de funcionamento básicos do CCN. Ele provê as bibliotecas e os componentes necessários para o desenvolvimento de aplicações em CCN.

O CCNx é programado em C e Java. O núcleo da implementação, responsável pela criação do sistema de encaminhamento de pacotes, de armazenamento (cache) e outras funcionalidades básicas é programado em C. A implementação em Java se utiliza das funções básicas implementadas em C e consiste de uma série de bibliotecas utilizadas para se criar aplicações e testes.

Atualmente o CCNx está disponível para sistemas baseados em Unix. A distribuição é testada em Ubuntu, MacOS, Solaris e FreeBSD, embora possa funcionar em outros sistemas operacionais. A implementação também compreende uma versão para Android.

A documentação referente ao CCNx, bem como descrição e especificações dos protocolos, convenções de nomenclatura e outras informações encontram-se no sítio do Projeto CCNx [9].

2.6 Críticas ao CCN

O CCN é hoje alvo de diversas críticas, relativas a variados aspectos de sua concepção. No entanto, as críticas mais contundentes se concentram a dois aspectos principais: eficiência do uso do cache e gerenciamento dos prefixos.

⁹*National Science Foundation* - <http://www.nsf.gov/>

Muitas das principais vantagens do CCN são fruto da opção de projeto de se ter um *cache* universal¹⁰, ou seja, presente em todos os nós de uma rede CCN. Essa característica é o que possibilita uma busca eficiente e recuperação rápida de conteúdo. O *cache* local de conteúdos é o que permite agregar interesses e transmitir apenas um pacote de Dados de cada tipo por enlace independentemente da demanda por esse conteúdo. A possibilidade de se fazer um eficiente controle de fluxo salto a salto, assim como o balanceamento de carga que o CCN proporciona estariam, portanto, diretamente ligados à presença do *cache* universal.

Caso o CCN viesse a ser adotado como modelo de Internet do Futuro, todo o conteúdo da Internet deveria ser armazenado de forma distribuída entre os nós da rede. No entanto, estudos sobre redes com *cache* cooperativo [21], modelo que se assemelha ao utilizado no CCN, e distribuições de probabilidade [22] mostram que a eficiência proporcionada pelo *cache* diminui substancialmente de acordo com a diminuição da popularidade dos conteúdos. Segundo esses estudos, a popularidade dos conteúdos da Internet seria uma distribuição de cauda longa¹¹ e, para os dados da cauda, a relação entre o ganho de eficiência proporcionados pelo *cache* e seu tamanho teriam uma relação logarítmica. Dessa maneira, mesmo com o expressivo barateamento dos custos de armazenamento [23] observados paulatinamente nos últimos vinte anos, em algum momento essa proposta se tornaria inviável, dado o constante aumento da quantidade de conteúdo e da velocidade de produção de conteúdo observado na Internet atual.

Os Nomes CCN são componentes binários formados por prefixos agregáveis. Diferentemente dos endereços IP, podem ter tamanhos e níveis de agregação variáveis. Os conteúdos também podem estar distribuídos pela rede de forma indiscriminada, visto que não estão atrelados a localização geográfica ou produtor. Essa diversidade dificulta o gerenciamento das tabelas de roteamento. Alternativas para este problema estão sendo propostas, mas não se tem certeza quanto à escalabilidade

¹⁰O termo *cache universal* designando um *cache* presente em todos os nós da rede foi inicialmente empregado em [20].

¹¹Distribuição em que o volume de dados é classificado de forma decrescente e onde a maior parte das ocorrências se situa longe do local em que a distribuição atinge seu pico.

dessas soluções, especialmente quando se considera o contingente total de conteúdo da Internet.

Em um estudo de de 2011, de Perino *et al.* [24], a escalabilidade do CCN é contestada. Através de modelos dos principais componentes de um roteador NDN, estimativas e cálculos, o estudo mostra que a implementação do CCN como substituto da Internet seria possível do ponto de vista tecnológico, mas inviável economicamente. O mesmo estudo, no entanto, verifica a viabilidade da implementação do CCN em uma escala de rede de distribuição de conteúdo (CDN) ou ISP.

Capítulo 3

Redes de Distribuição de Conteúdo

Se por um lado a falta de uma organização centralizada favoreceu a disseminação e evolução da Internet como meio de comunicação, por outro lado, essa falta de controle torna extremamente difícil garantir regularidade nos níveis de desempenho da Internet [2]. Essa situação vem se agravando com a mudança no padrão dos usuários, que passaram a ser também produtores de conteúdo, e a disseminação do uso de serviços vorazes em termo de consumo de banda, como é o caso de distribuição contínua (*streaming*) de vídeo e áudio.

As redes de distribuição de conteúdo (*Content Distribution Networks* ou *Content Delivery Networks* - CDNs) foram concebidas com o objetivo de resolver esses problemas de desempenho. As CDNs trabalham no sentido de oferecer os recursos necessários para se garantir uma boa qualidade de serviço (QoS) continuamente, independentemente de flutuações de demanda.

A escalabilidade das soluções adotadas nas CDNs é garantida pela distribuição de servidores com cópias dos conteúdos desejados [10]. Uma CDN pode servir a múltiplos provedores de conteúdo concomitantemente. Assim sendo, existe um mercado de serviços de CDN, pois o compartilhamento de recursos gera economias de escala. Os provedores de conteúdo contratam o serviço e cabe ao provedor de serviços (SP) garantir os níveis de desempenho contratados.

3.1 Arquitetura de uma CDN genérica

Usualmente a estratégia utilizada pelos SPs para garantir qualidade de serviço em termos de latência e uso de banda é baseada em replicação de conteúdos. Os SPs criam cópias do conteúdo do servidor de origem e as armazenam em servidores mais próximos aos usuários finais. Esses servidores normalmente se encontram na interface entre as CDNs e as redes dos ISPs, que são os responsáveis por efetivamente conectarem os usuários a esses servidores. Os usuários são redirecionados para esses servidores de réplicas quando tentam acessar um conteúdo presente no servidor de origem. Esse mecanismo normalmente garante melhor desempenho, mesmo que a entrega do conteúdo dependa da rede dos ISPs, visto que usuários e servidores estão mais próximos. O uso de diversos servidores mais próximos ao cliente também reduz o custo de utilização da rede de comunicação [2]. A estrutura genérica de uma CDN é mostrada na Figura 3.1.

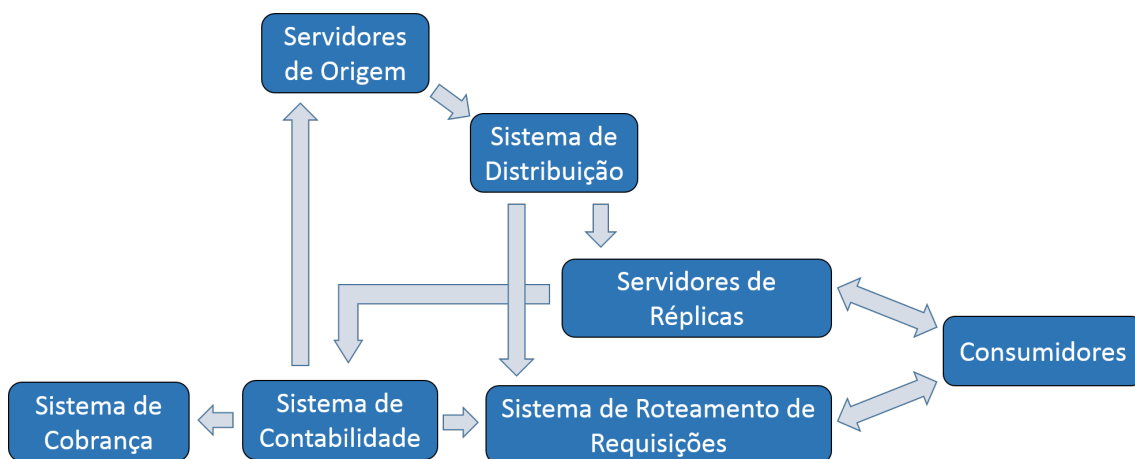


Figura 3.1: Estrutura genérica de uma CDN. *Adaptado de [2].*

Numa rede de distribuição de conteúdo, os servidores de origem delegam seus *Uniform Resource Identifiers* (URIs) ao Sistema de Roteamento de Requisições da CDN e enviam os conteúdos a serem distribuídos a seu Sistema de Distribuição. A CDN, então, passa a gerenciar as demandas por conteúdo e usa o Sistema de Distribuição para replicar conteúdos entre os Servidores de Réplicas. Essas informações são enviadas ao Sistema de Roteamento de Requisições como retroalimentação (*feedback*), para ajudar no processo decisório do redirecionamento de requisições.

Quando um consumidor faz uma requisição por um URI delegado à CDN, ele é redirecionado para o Sistema de Roteamento de Requisições, que o encaminha para um dos Servidores de Réplicas. O Servidor de Réplica selecionado é o responsável por responder às requisições do cliente. Adicionalmente, o servidor envia informações ao Sistema de Contabilidade, que cria estatísticas e registros a partir das informações a respeito das requisições dos consumidores. Essas informações são enviadas ao Sistema de Cobrança do provedor de serviços, responsável por calcular o valor a ser cobrado pelos serviços prestados. As estatísticas geradas pelo Sistema de Contabilidade também são utilizadas como retroalimentação para o Sistema de Roteamento de Requisições.

O Sistema de Distribuição envia o conteúdo aos servidores de réplicas. Ele também interage com o Sistema de Roteamento de Requisições e recebe informações acerca das requisições recebidas. Essas informações ajudam os Sistema de Roteamento de Requisições a ajustar sua política de redirecionamento, a fim de melhor atender as requisições dos consumidores.

3.2 Gerenciamento de CDNs

A abordagem apresentada, embora interessante, se tornaria inviável caso a quantidade total de conteúdo de cada provedor que contratou um serviço de CDN tivesse que ser armazenada em cada um dos servidores de réplicas. Desse modo, os SPs possuem sistemas de gerenciamento do fluxo de informação. Os principais desafios concentram-se em como distribuir os conteúdos de forma eficiente e como gerenciar o redirecionamento das requisições dos consumidores de modo a manter a qualidade do serviço. Existem diversas estratégias para se resolver esses problemas e combinações delas podem ser usadas a fim de se atingir os objetivos almejados. As principais soluções são apresentadas a seguir.

3.2.1 Gerenciamento da distribuição de conteúdo

A distribuição de conteúdo entre os servidores de réplicas normalmente é feita utilizando-se a própria Internet. Outros meios, como satélites disseminando conteúdo

via difusão (*broadcasting*), também podem ser empregados, mas a primeira alternativa é mais simples.

A distribuição via Internet é feita através de distribuição em árvore de servidores ou com redes virtuais sobrepostas à Internet. Embora essas estratégias estejam sujeitas aos problemas de desempenho da própria Internet, estes não constituem o principal desafio na distribuição de conteúdo. A escolha do posicionamento geográfico dos servidores de réplicas e a distribuição das réplicas de conteúdo entre os servidores de modo a garantir altos níveis de desempenho e um balanceamento de carga eficiente são problemas mais complexos e que exigem maior atenção.

3.2.1.1 Posicionamento dos servidores de réplicas

Intuitivamente, pode-se inferir que os servidores de réplicas deveriam ficar tão próximos aos consumidores finais quanto possível, de modo a reduzir a latência e o uso de banda. No entanto, deve-se atentar ao fato que o número de servidores a serem distribuídos é restrito, a distribuição geográfica dos consumidores é irregular, e o servidor de origem tem um posicionamento fixo. Isto posto, a busca de soluções ótimas a fim de reduzir custos e garantir os níveis de serviço prometidos (pelos SPs aos consumidores) se faz necessária.

Existem abordagens teóricas para a resolução desses problemas, mas elas são extremamente custosas em termos computacionais. Normalmente essas abordagens são variações dos problemas de *k-centros*, *k-centros métricos*, ou *localização das facilities*, ou são baseadas em teorias dos grafos, utilizando, por exemplo algoritmos *k-HST*¹ e algoritmos gananciosos.

Soluções teóricas exatas para os problemas de *k-centros* [25] implicam na resolução de problemas *NP-difíceis*² e mesmo soluções aproximadas que reduzem o nível de complexidade do problema ainda apresentam custos computacionais elevados [2]. Já para os problemas baseados em *k-HST* [26, 27] e algoritmos gananciosos, as soluções

¹*k-Hierarchically Well Separated Trees*

²Problemas em que não há garantias de que a solução possa ser encontrada dentro de um tempo polinomial da ordem do problema

se baseiam na criação de árvores a partir de grafos da rede de forma recursiva e também incorrem em alto custo computacional.

Soluções heurísticas sub-ótimas [28, 29] foram criadas com o objetivo de reduzir o custo computacional necessário para se escolher a localização dos servidores de réplicas. Além disso essas soluções levam em consideração algumas informações, como topologia e padrões da carga da rede, *a priori* de modo que se tornam mais adequadas para serem aplicadas na prática [28]. Dessa maneira conseguem boas aproximações de ótimo com um custo computacional reduzido.

3.2.1.2 Disponibilização dos conteúdos nos servidores de réplicas

A carga em cada servidor de réplicas é influenciada não só pelo seu posicionamento geográfico, mas também pelos conteúdos nele disponibilizados. A sobrecarga de alguns servidores de réplicas implica em perda de desempenho geral do sistema. Numa situação de sobrecarga os consumidores se conectam a servidores mais afastados, o que impacta negativamente os ganhos em termos de latência e consumo de banda proporcionados pelo uso dos servidores de réplica. Dessa maneira, os conteúdos devem ser replicados de modo a balancear a carga total do sistema.

A distribuição de réplicas entre os servidores é um problema complexo. Deve-se decidir quantas réplicas de determinado conteúdo devem existir e em quais servidores elas devem ser hospedadas. Como no caso da distribuição de servidores, o problema pode ser modelado como um problema de otimização de *k-centros* [30], o que implica em um problema NP-difícil e desestimula a solução por esse método. Em vista disso, heurísticas de seleção dos conteúdos a serem replicados e dos respectivos servidores para hospedá-los foram criadas.

Existem três abordagens [31] principais para a distribuição de réplicas: popularidade, gananciosa simples e gananciosa global.

Na primeira heurística, cada servidor decide independentemente se deve ou não armazenar uma réplica de determinado conteúdo baseado apenas na sua popularidade.

A segunda heurística tem como objetivo minimizar as latências do consumidor. Por esse motivo, a função de custo a ser minimizada pelo algoritmo ganancioso é o produto entre a popularidade de um conteúdo e a distância relativa entre o servidor de réplicas e o servidor de origem. Como na heurística anterior, a escolha dos conteúdos a serem replicados cabe a cada servidor de réplicas.

A terceira heurística, a gananciosa global, é uma otimização da heurística anterior, pois leva em consideração as réplicas de conteúdo existentes em outros servidores de réplicas, não apenas no servidor de origem. Sua função de custo é um produto entre a taxa total de pedidos no servidor, a popularidade do conteúdo e a distância até sua cópia mais próxima. Essa heurística gera os melhores resultados quando comparada com as anteriores, embora seja mais complexa e exija um sistema de comunicação eficiente entre os servidores.

3.2.1.3 Atualização dos conteúdos no servidores de réplicas

Os conteúdos devem ser atualizados a fim de manter os níveis de desempenho da CDN mesmo que o padrão de consumo mude. Conforme apresentado na Figura 3.1, existe um sistema de retroalimentação, que, em cooperação com algoritmos de otimização, ajuda nesse processo. Estudos sobre cache distribuído e cache cooperativo[32, 33] mostram que a cooperação entre servidores pode melhorar significativamente o desempenho da rede.

Existem três abordagens mais comuns para a atualização dos conteúdos nos servidores de réplicas. São elas: cooperativa passiva, não cooperativa ativa e cooperativa ativa.

A primeira abordagem é utilizada em cooperação com uma estratégia de replicação gananciosa global. Dessa maneira, a CDN possui informação sobre todos os conteúdos presentes em cada servidor de réplicas e a localização de todos os servidores. Pedidos recebidos são sempre encaminhados ao servidor mais próximo, ou, caso não existam nesse servidor, são enviados diretamente ao servidor de origem. A gestão da replicação de conteúdos é feita exclusivamente pelo algoritmo ganancioso global.

Na segunda abordagem o consumidor é sempre redirecionado para o servidor de réplicas mais próximo. Caso este não possua o conteúdo desejado, é o servidor de réplicas quem pede ao servidor de origem o conteúdo. O conteúdo é, então, armazenado e o consumidor servido. Essa estratégia é considerada ativa no sentido em que o servidor de réplicas busca de forma ativa por um conteúdo requisitado que ele não possua.

A terceira abordagem, cooperativa ativa, difere da segunda na medida em que evita pedir conteúdos ao servidor de origem. Caso não possua o conteúdo desejado pelo consumidor, o servidor de réplicas localiza o servidor mais próximo que possua o conteúdo desejado. Ele então pede o conteúdo, o armazena e serve o consumidor. Com isso se evita aumento da latência e consumo de banda desnecessário.

3.2.2 Gerenciamento das requisições

As requisições dos consumidores endereçadas ao servidor de origem devem ser encaminhadas aos servidores de réplicas de forma transparente. Existem diversas técnicas para escolher o servidor mais apto a servir o consumidor. Essa escolha normalmente em consideração a distância até o servidor e sua carga.

A distância até um servidor normalmente é medida em número de saltos ou RTT. Ferramentas como *ping* e *traceroute* são comumente utilizadas. Já para se obter a informação de carga do servidor, existem métodos ativos, como sondas do cliente (*client probe*), e métodos passivos, como difusão pelos servidores (*server push*). No primeiro, existem agentes que enviam requisições de carga de servidores de interesse periodicamente. Já no segundo, os servidores são os responsáveis por propagar informações de carga.

De posse das informações sobre os servidores, é necessário se encaminharem as requisições. Em geral esse encaminhamento pode ser classificado em uma das seguintes categorias: multiplexação de clientes, redirecionamento HTTP, redirecionamento DNS, *anycasting* e roteamento *peer to peer*.

- Multiplexação de clientes: nesse modelo o consumidor, ou um *proxy* próximo

ao consumidor recebe uma lista de endereços de servidores de réplicas candidatas e deve escolher um deles para pedir o conteúdo desejado. Normalmente existe uma sobrecarga (*overhead*) no envio da lista de servidores ao cliente. Além disso, como o cliente não possui informações sobre a rede, pode escolher um servidor que já esteja sobrecarregado.

- Redirecionamento HTTP: todas as requisições chegam ao servidor de origem e são posteriormente reencaminhadas para uma outra URL no nível de protocolo HTTP. Esta é a solução mais simples, mas é centralizada e, portanto, possui ponto único de falha.
- Redirecionamento de DNS: nesse esquema são feitas modificações no DNS para que este retorne o endereço IP de um servidor de réplicas dentro de uma lista de servidores possíveis. A técnica é transparente para o cliente e pode levar em consideração a carga dos servidores, o que é uma vantagem. Ela é usada em CDNs comerciais, como a Akamai.
- *Anycasting*: um endereço *anycast* pode ser uma URL de conteúdo ou um endereço IP *anycast*³. Um cliente buscando um servidor manda pacotes com o endereço *anycast* desejado no campo de destino. O pacote é roteado por servidores que compreendem *anycast* até um servidor que responda pelo endereço. Essa solução escala bem com o crescimento da Internet.
- Roteamento *peer to peer*: os nós que participam do sistema *peer to peer* formam uma rede *ad hoc*. Em geral, a rede é composta por usuários que decidem compartilhar conteúdos com outros usuários. A natureza heterogênea e mutável da rede não garante desempenho e disponibilidade de conteúdo estáveis. As rotas necessitam ser constantemente atualizadas, visto que novos participantes entram e saem da rede, e existe dificuldade em se propagar a informação e entregá-la a um *peer* específico sem incorrer em grande sobrecarga (*overhead*).

³Endereço IP que identifica um conjunto de receptores. Requisições enviadas para um endereço *anycast* são respondidas pelo receptor mais próximo. A escolha do receptor está sujeita ao critério de proximidade adotado.

Capítulo 4

O Sistema Proposto

O sistema proposto nesse projeto de graduação prevê a implementação de uma rede CCN superposta à rede dos ISPs trabalhando de forma cooperativa com as CDNs a fim de facilitar a distribuição de conteúdo. O sistema é proposto como uma alternativa para a distribuição de vídeo sob demanda (*Video on Demand - VoD*). Sua arquitetura é ilustrada na figura 4.1.

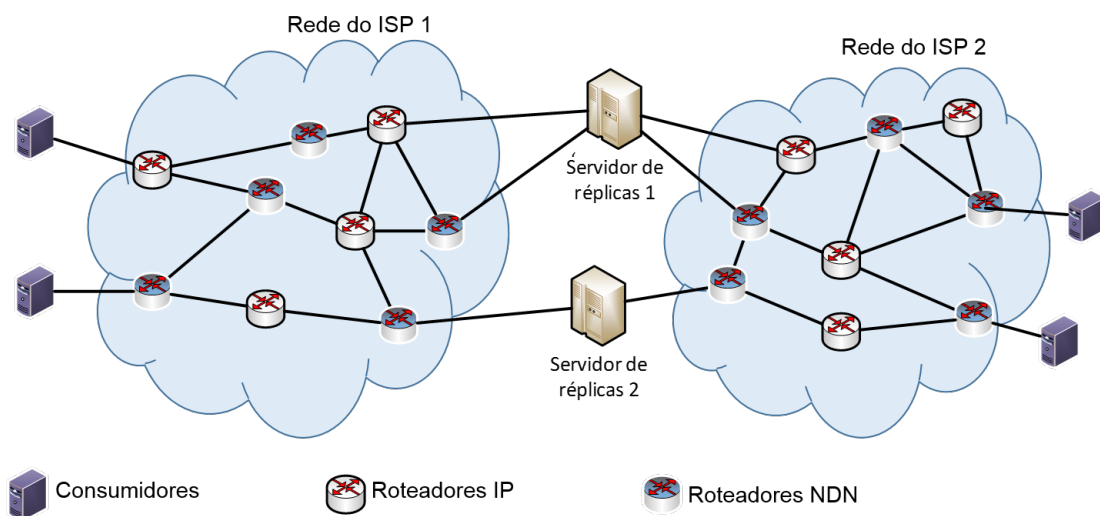


Figura 4.1: Rede de distribuição mista IP/CCN. A rede de distribuição trabalha cooperativamente com as CDNs, distribuindo conteúdo através da rede dos ISPs.

4.1 Trabalhos relacionados

Em *Named Content Delivery Network*[11], de Jiang e Bi, é proposta a utilização de dados nomeados (*Named Data Networking - NDN*) em redes de distribuição

de conteúdo, criando o conceito de redes de distribuição de conteúdos nomeados (nCDN). Na nCDN, os SPs se focam apenas em serviços de mais alto nível, como análise de tráfego e cobrança pelos serviços prestados, enquanto o gerenciamento do roteamento e distribuição de conteúdo é delegado a uma rede orientada a conteúdo superposta à rede IP. Segundo os autores, a introdução da orientação a conteúdo através da NDN permite utilizar múltiplas fontes e múltiplos destinos e facilita o gerenciamento da distribuição de conteúdo, melhorando, assim, o desempenho das CDNs. Para se avaliar o desempenho da proposta nCDN, foi feita uma série de simulações utilizando ndnSIM, um simulador de NDN baseado no NS3 [34], a fim de se comparar a performance entre CDNs convencionais e a nCDN. Os resultados mostram que o uso do paradigma do NDN em redes de distribuição de conteúdo melhora consideravelmente sua eficiência em diversos aspectos, como rendimento máximo em situação de sobrecarga, latência, recuperação de falhas de nós ou queda de enlaces (*links*), entre outros. Os autores propõem como trabalho futuro a implementação de um protótipo de nCDN utilizando o CCNx e CDNs de código livre, como Globulle[35].

O sistema proposto neste trabalho apresenta uma abordagem semelhante ao utilizar roteadores NDN para criar uma rede de distribuição de VoD sobreposta à rede dos ISPs. Ressalta-se que a proposta nCDN, de Jiang e Bi, foi avaliada apenas mediante simulações e a implementação de um protótipo de rede foi deixada como trabalho futuro. Este projeto de fim de curso procura preencher esta lacuna e, por esse motivo, o desempenho do sistema proposto é avaliado a partir de dados reais coletados de uma rede experimental implementada especialmente para esse fim.

Em Frank *et al.* [36] é feito um estudo sobre a colaboração entre ISPs e CDNs. Frank *et al.* defendem que muitas vezes a eficiência da distribuição de conteúdo é prejudicada porque o sistema de distribuição de conteúdo se vale de informações equivocadas sobre a localização dos consumidores ou informações deficientes sobre o estado da rede. No artigo, são identificados dois aspectos chave para a melhora de desempenho da distribuição de conteúdo: informar ao cliente a localização do servidor a que será encaminhado e a alocar servidores dentro das redes dos ISPs. O protocolo NetPaaS (*Network Platform as a Service*) é proposto como uma solução

capaz de facilitar essa colaboração entre ISPs e CDNs ao permitir uma comunicação efetiva entre ambos os agentes.

O NetPaaS permite que as CDNs peçam aos ISPs indicações dos melhores servidores para encaminhar os consumidores, permite às CDNs saber quais recursos os ISPs têm a oferecer e possibilita às CDNs alocar recursos nesses servidores disponíveis. Os resultados obtidos indicam que o NetPaaS possibilita uma redução do consumo de banda e do atraso na recepção de conteúdo. Contudo, o NetPaaS não tange o que diz respeito à escolha de réplicas a serem alocadas em cada servidor. Cabe às CDNs gerenciar esse processo.

Este trabalho propõe um sistema que, à semelhança do NetPaaS, utiliza de forma eficiente as redes dos ISPs para a distribuição de conteúdo e com isso proporciona ganhos em desempenho. O sistema proposto é mais abrangente que o NetPaaS, no sentido em que é o responsável pela distribuição de conteúdo, não apenas pela comunicação entre os ISPs e as CDNs. Além disso, o sistema utiliza NDN para distribuir o conteúdo. Por essa razão esperam-se a ganhos de desempenho similares aos apresentados por Jiang e Bi no seu artigo de nCDN.

4.2 Descrição do sistema proposto

No sistema proposto, uma rede CCN é implementada sobreposta às redes dos ISPs e conectada a um ou mais servidores NDN. A rede é voltada para a distribuição de vídeo sob demanda e a distribuição do conteúdo é gerenciada pela própria dinâmica da rede CCN: os conteúdos são enviados sob demanda e cópias dos pacotes de Dados são armazenadas nos roteadores que os encaminham. A rede CCN distribui os conteúdos até pontos de conversão existentes nas bordas da rede dos ISPs, aos quais os consumidores se conectam via IP a fim de acessar os conteúdos disponibilizados. Essa configuração permite utilizar todas as vantagens do CCN frente ao IP no que diz respeito à distribuição de conteúdo, e em particular a agregação de fluxos, o que permite uma otimização do uso de recursos, em especial o uso de banda.

Um aspecto importante do sistema é o fato de se terem feito escolhas de projeto de modo a minimizar ou atenuar deficiências do CCN. Conforme apresentado na Seção 2.6, o gerenciamento de Nomes CCN não é possível, do ponto de vista tecnológico, quando se considera uma implementação global da arquitetura. No entanto, uma implementação em nível de ISP ou CDN seria perfeitamente viável e por esse motivo, a solução proposta prevê uma rede sobreposta à rede dos ISPs.

Outra crítica ao CCN diz respeito aos ganhos de eficiência proporcionados pelo *cache* cooperativo diminuir substancialmente de acordo com a diminuição da popularidades dos conteúdos distribuídos. Essas críticas também só são válidas quando se considera uma escala global. A popularidade dos conteúdos da Internet, de fato, segue uma distribuição de cauda longa e, para os dados da cauda, a relação entre o ganho de eficiência proporcionados pelo *cache* e seu tamanho teriam uma relação logarítmica. Quando se considera a quantidade de conteúdos da Internet como um todo, o CCN se mostra inviável. No entanto, a limitação do escopo da distribuição aos conteúdos disponibilizados pelo servidor NDN limita a quantidade de conteúdo, o que possibilita um melhor armazenamento em *cache*. Além disso, uma simples gestão dos conteúdos disponibilizados na forma de dados nomeados garante que apenas conteúdos populares sejam difundidos pela rede CCN.

A aplicação visada pelo sistema é a distribuição de vídeo sob demanda, o que vai ao encontro das novas tendências de uso da Internet. O serviço Netflix, que disponibiliza conteúdo de vídeo sob demanda é responsável por 30% do tráfego de rede na América do Norte durante o horário de pico[36]. Além disso, as atividades de distribuição contínua de vídeo consomem banda intensamente e a agregação de Dados e Interesses realizada pelo CCN proporciona economia do uso de banda. Na distribuição de VoD, esse impacto é potencializado, como mostrado em Fricker *et al.* [37]. No artigo é feita uma análise do custo-benefício do uso de memória a fim de se obter economia de banda em redes CCN. Segundo o estudo, a quantidade de *cache* necessária se obter economias de banda consideráveis na distribuição de VoD é várias vezes menor que a quantidade necessária para se obter o mesmo efeito com outros tipos de tráfego, como compartilhando arquivos acessando sites na *web*.

Os pontos de conversão situados nas bordas da rede reconstróem o conteúdo a partir dos pedaços de conteúdo nomeado recebidos e o disponibilizam aos clientes via IP. O conteúdo pode ser disponibilizado via HTTP, RTSP, UDP, TCP e quaisquer outros métodos comumente utilizados para distribuição de vídeo. Esses pontos de conversão também são roteadores NDN e concentram todos os pedidos dos consumidores. Eles são os responsáveis por gerar os pedidos de Interesse pelos conteúdos buscados e, como rodam CCN, agregam esses Interesses antes de enviá-los, o que reduz a carga no núcleo da rede dos ISPs. Adicionalmente, a agregação de fluxos de Interesses e Dados isola o núcleo da rede das flutuações na demanda percebidas em suas bordas, pois dispositivos podem se conectar aos pontos de conversão até que sua capacidade de conexão se esgote, sem que fluxos duplicados sejam repassados para o núcleo da rede. A distribuição dos conteúdos aos consumidores a partir dos pontos de conversão, no entanto, pressupõe a duplicação de fluxos, pois é feita via IP, em *unicast*. Por esse motivo, os pontos de conversão devem ser instalados próximos às bordas da rede a fim de minimizar o número saltos necessário para se alcançar os consumidores e com isso reduzir o número de enlaces em que haja fluxos duplicados.

Quanto mais roteadores NDN existirem na rede, menor o número de pacotes duplicados que circulam pelos roteadores funcionando puramente com IP, como explicado na Seção 2.3.3. Isso cria um incentivo adicional para a instalação de roteadores NDN na rede de distribuição. Essa instalação pode ser incremental e os roteadores NDN não precisam substituir roteadores IP; podem ser agregados à rede, já que o CCN roda sobre IP. Além disso, o eficiente balanceamento de carga oferecido pelo CCN [38] permite que a rede seja ainda menos sobrecarregada. Isso constitui uma grande vantagem quando considerado o crescimento do número de dispositivos móveis, como *smartphones* e *tablets* verificado nos últimos anos. Conteúdos antes não disponibilizados para dispositivos móveis poderiam passar a sê-lo uma vez disseminados pontos de conversão e roteadores NDN nas redes dos ISPs.

Caso a rede de distribuição se desenvolva a ponto de surgirem aplicações CCN para dispositivos pessoais, a eficiência da rede aumentará ainda mais. A dinâmica do CCN prevê a busca por pedaços de conteúdo no *cache* de quaisquer dispositivos

CCN próximos. Dessa maneira a rede de distribuição será complementada por uma rede *peer to peer* formada por tais dispositivos. A rede de distribuição detecta esses recursos adicionais automaticamente e com isso aumenta sua abrangência e eficiência. Dispositivos que possuem recursos limitados, como *smartphones*, podem optar por continuar a usar os pontos de conversão e acessar os conteúdos via conexão IP a fim de economizar recursos como memória e bateria. Ao utilizar uma aplicação IP em vez de uma aplicação CCN para obter conteúdo, os dispositivos ficam isentos de difundir os Nomes dos conteúdos que possuem e de enviar conteúdo ao satisfazer pedidos de Interesse e só recebem o que foi pedido, o que proporciona economias de bateria [39] devido à redução do tráfego de dados.

Capítulo 5

Implementação e Avaliação de Desempenho

5.1 A rede de testes

O sistema desenvolvido tem como objetivo principal reduzir o consumo de banda utilizado na distribuição de vídeo sob demanda pela utilização de CCN para distribuição de vídeo. Para a realização dos testes, foi criada uma rede protótipo com o objetivo de se reproduzir, em menor escala, uma rede de distribuição sobreposta à rede de um ISP. A Figura 5.1 apresenta a arquitetura da rede de testes.

A rede é formada por quatro roteadores NDN, um provedor de conteúdo e nove consumidores. Os Roteadores 1, 2 e 3 representam os pontos de conversão e por isso estão ligados diretamente aos clientes. Cada ponto de conversão está ligada a três clientes. O Roteador 0 está ligado ao provedor de conteúdo e possui conexões redundantes, formando uma malha com os Roteadores 1, 2 e 3. A intenção é replicar a dinâmica de uma rede real, mas em menor escala, por isso o uso de caminhos redundantes. Cada enlace da rede é representado por um número, no formato “Link n^o ”. Essa identificação é necessária para se correlacionar os dados recolhidos durante os testes com os respectivos enlaces. As denominações “Link 610”, “Link 620” e “Link 630” são as únicas que fogem à regra, pois são utilizadas para se referir, respectivamente, aos dados agregados dos grupos de enlaces 611 a 613, 621 a 623 e 631 a 633.

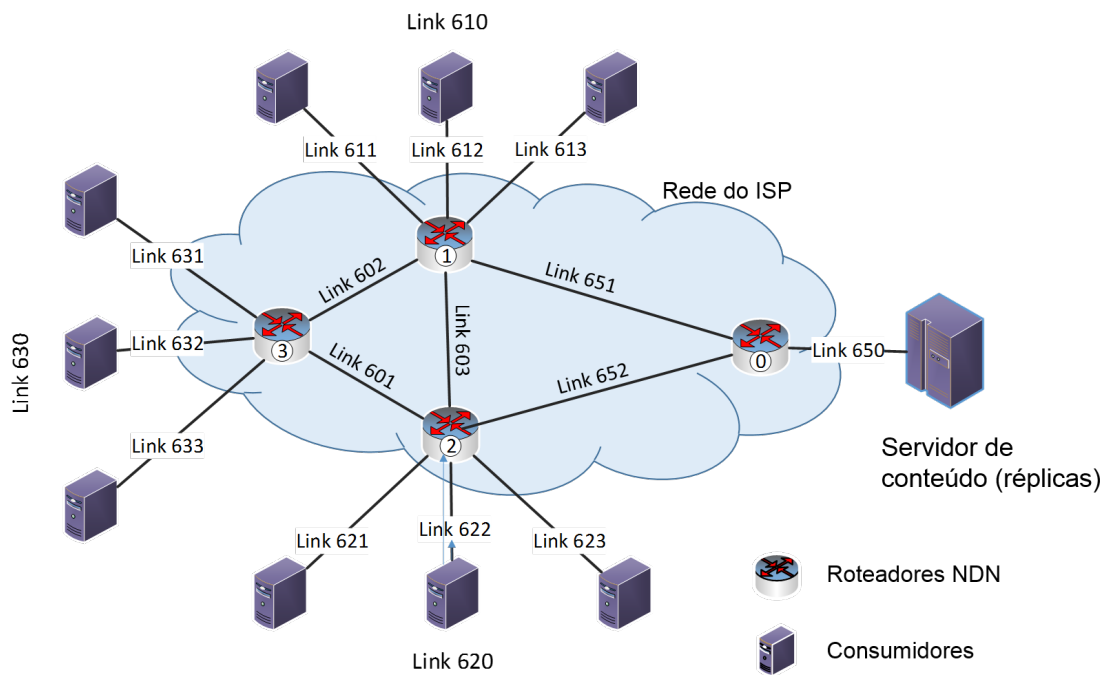


Figura 5.1: Arquitetura da rede de testes usada: servidor de conteúdo, roteadores NDN atuando como pontos de conversão e consumidores de conteúdo.

A inexistência de roteadores puramente IP na rede não faz com que os testes realizados utilizando essa arquitetura como base percam generalidade. Os roteadores da rede NDN também roteiam IP. No entanto, quando do roteamento de conteúdo nomeado, só se endereçam a outros roteadores NDN. Os enlaces mostrados no esquema, na prática, poderiam passar por diversos caminhos físicos. Por motivo de simplificação, não foram criados caminhos alternativos utilizando apenas roteadores IP. A presença desses caminhos alternativos não influencia a comparação de desempenho entre a distribuição via IP ou CCN, já que a carga sobre os enlaces que os compõem afeta ambas as redes.

Além da rede apresentada na Figura 5.1, existe uma rede de controle. A rede de controle é constituída por uma máquina de controle ligada a cada uma das máquinas da rede de distribuição. Essa máquina de controle é utilizada para controlar os testes e coletar estatísticas. Por motivo de simplificação, a rede de controle foi omitida da figura, pois não contribui ativamente na distribuição de conteúdo.

5.2 O ambiente de testes - o FITS

Os testes foram realizados no *Future Internet Testbed with Security* (FITS) [40], uma plataforma de testes interuniversitária para propostas de Internet do Futuro. O FITS é mantido pelo Grupo de Teleinformática e Automação (GTA) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), e possui nós em universidades de vários estados do Brasil e em países da Europa.

O FITS foi concebido de modo que a instalação de novos nós e a manutenção do *testbed* fossem simples. A maior parte dos nós da rede do FITS consiste de computadores pessoais executando Linux Debian nos quais a plataforma foi instalada. O FITS usa um sistema híbrido baseado em Xen e OpenFlow a fim de proporcionar ferramentas de gerenciamento de redes virtuais para os administradores. O FITS possui suporte a diversas operações, como migração, criação e destruição de máquinas virtuais, entre outras.

O Xen é uma das plataformas de virtualização mais utilizadas atualmente. O Xen possui código aberto e sua arquitetura permite que cada máquina virtual seja também um roteador virtual. Dessa maneira, o Xen permite inovação em redes de computadores, pois um roteador físico pode suportar múltiplos roteadores virtuais com propriedades e pilhas de protocolos distintas.

O OpenFlow é um padrão aberto capaz de executar protocolos experimentais. O OpenFlow pode ser incorporado como recurso adicional em comutadores, roteadores e pontos de acesso comerciais de modo a possibilitar que estes rodem os protocolos experimentais sem que haja necessidade de se conhecer o funcionamento interno dos dispositivos.

5.3 A configuração das máquinas

Nos testes foram usadas duas máquinas físicas, ambas nós do FITS. Uma das máquinas físicas hospedou todos os roteadores NDN e os consumidores, enquanto a outra fez o papel do servidor de conteúdo e máquina de controle.

A máquina usada como servidor de conteúdo e máquina de controle possui um processador Intel® Core™ i7 920 @2.67 GHz, com 8 núcleos, 6 GB de memória, disco rígido de 500 GB e sistema operacional Linux Debian Wheezy versão 3.2.0-4-amd64.

A máquina hospedeira possui um processador Intel® Xeon® 5690 @3.47 GHz, com 12 núcleos físicos e *hyperthreading*, o que se configura num total de 24 núcleos lógicos, 48 GB de memória, disco rígido de 8TB e sistema operacional Linux Debian Wheezy versão 3.2.0-4-amd64.

Os roteadores NDN que realizam a conversão possuem, cada um, quatro núcleos lógicos dedicados e 2 GB de memória. Neles foi instalado o CCNx versão 0.8.0, o VLC media player versão 2.0.3, e um *plugin* do CCNx para o VLC que o torna capaz de reproduzir arquivos multimídia a partir de seu Nome CCN. O VLC é utilizado para fazer a conversão dos vídeos de CCN para IP.

O roteador 0 é utilizado apenas para distribuição dos pacotes. Como não realiza operações mais vorazes em uso de processamento e memória, como é o caso da conversão de formato, ele foi configurado com apenas um núcleo lógico dedicado e 256 MB de memória. A mesma configuração foi usada nos consumidores, que possuem, cada um, apenas um núcleo lógico dedicado e 256 MB de memória. Nos consumidores também foi instalado o VLC, para que fossem capazes de reproduzir os vídeos enviados durante os testes.

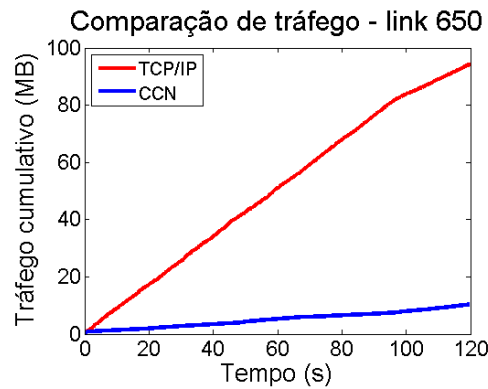
5.4 Os cenários de testes

Para se comparar o desempenho na distribuição de vídeo foi enviado um vídeo de aproximadamente 100 MB dentro de uma janela de dois minutos utilizando-se TCP/IP e CCN. Um vídeo longo foi escolhido para que, dentro de uma janela de tempo longa o suficiente para se ter medidas confiáveis, o vídeo não tivesse sido inteiramente baixado, independente do método utilizado. Essa medida foi escolhida em detrimento da alternativa de se limitar a banda nos enlaces, de modo que todos os enlaces foram mantidos com taxa de transmissão padrão de 1 Gb/s.

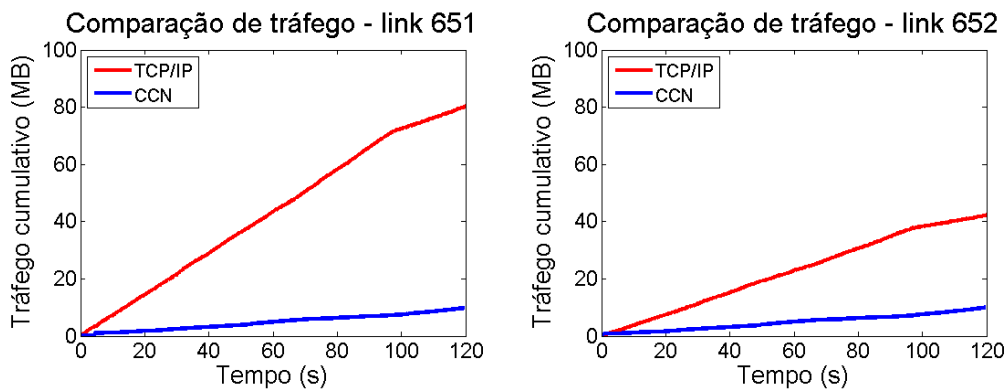
Nos testes utilizando CCN, o vídeo foi disponibilizado no servidor como conteúdo nomeado, distribuído via CCN até os nós de borda e então convertido para formato HTTP. Nos testes utilizando TCP/IP, o vídeo foi disponibilizado em HTTP diretamente no servidor.

5.5 A avaliação de desempenho

A avaliação de desempenho foi feita mediante comparação do uso de banda total em cada enlace, expressado como uma função cumulativa da quantidade de *bytes* trafegados.



(a) Enlace entre o servidor e a rede de distribuição.



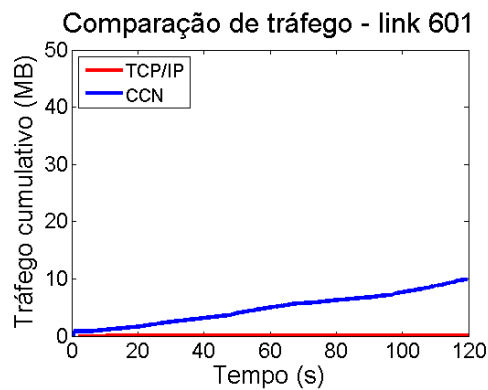
(b) Enlaces próximos ao servidor.

Figura 5.2: Quanto mais próximo ao servidor, menor o consumo de banda na distribuição via CCN relativamente ao consumo de banda na distribuição via IP.

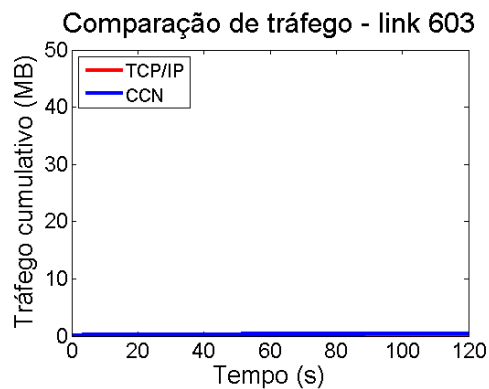
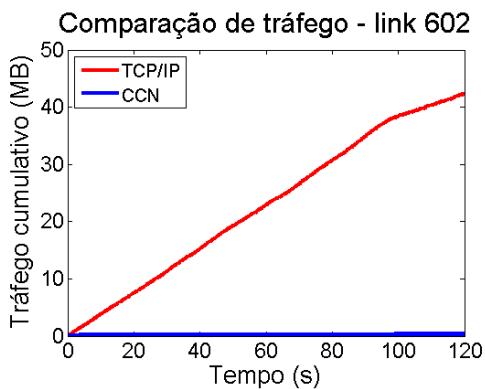
A Figura 5.2 mostra a quantidade de *bytes* trafegados nos enlaces da rede de distribuição próximos ao servidor. Como esperado, pode-se observar claramente

que o consumo de banda utilizando distribuição via CCN é muitas vezes menor que o consumo de banda utilizando TCP/IP.

O mesmo comportamento pode ser observado nos enlaces do núcleo da rede de distribuição e nos enlaces mais próximos à borda da rede. Embora o consumo de banda em alguns enlaces possa ser maior quando a distribuição de vídeo é feita via CCN, como é o caso do gráfico apresentado na figura 5.3(a), pode-se observar que o consumo de banda total no núcleo da rede, quando se agregam todos os enlaces do núcleo, é menor quando se usa a rede orientada a conteúdo (CCN) como canal de distribuição.



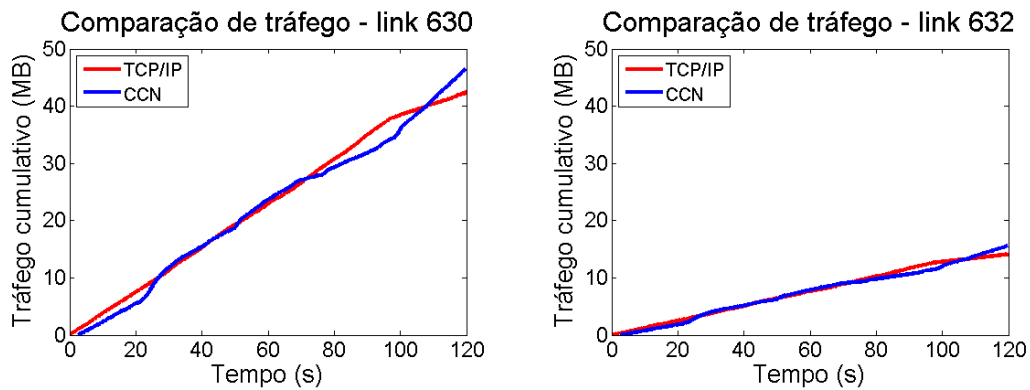
(a) Exemplo de enlace no qual a distribuição via IP foi mais eficiente que a distribuição via CCN.



(b) Exemplo de enlace no qual a distribuição via IP foi mais eficiente que a distribuição via CCN. (c) Enlace em que a distribuição via IP e a distribuição via CCN tiveram aproximadamente o mesmo desempenho.

Figura 5.3: O consumo de banda utilizando CCN é claramente menor quando se agrega o consumo de todos os enlaces.

Quando se considera a última milha, a distribuição é sempre feita via IP, em *unicast*, independentemente do método de distribuição utilizado no núcleo da rede. Por essa razão, a quantidade total de *bytes* enviada é aproximadamente a mesma para ambos os métodos de distribuição de vídeo. A Figura 5.4(a) apresenta um gráfico com o consumo de banda agregado de todos os clientes ligados ao roteador número 3, enquanto que no gráfico da Figura 5.4(b), o consumo de apenas um cliente é isolado.



(a) Consumo de banda agregado dos clientes ligados ao Roteador NDN 3. (b) Consumo de banda de um dos clientes ligados ao Roteador NDN 3.

Figura 5.4: Tráfego da distribuição de conteúdo para os consumidores. Na extremidade da rede, a distribuição é sempre feita via IP, portanto igual para ambos os experimentos.

Capítulo 6

Conclusão

A Rede Orientada a Conteúdo (CCN) é uma proposta de Internet do Futuro que tem o intuito de substituir a Internet baseada em IP e, nesse sentido, poderia ser considerada uma proposta monista. No entanto, o sistema proposto nesse trabalho prevê utilizá-la concomitantemente com a rede IP para aumentar sua performance, o que vai de acordo com a abordagem pluralista de propostas de Internet do Futuro.

O sistema proposto prevê a utilização de uma rede CCN sobreposta às redes dos ISPs para distribuição de conteúdo de vídeo sob demanda. O sistema trabalha em cooperação com CDNs, de modo que existe um provedor de conteúdo, ou seja, um servidor de réplicas de uma CDN, ligado à rede de distribuição proposta. A utilização de conteúdo nomeado desacopla os dados da localização geográfica de seus provedores, no caso, os servidores de réplicas, de modo que a eficiência na distribuição de conteúdos é aumentada. A distribuição de conteúdo através da rede CCN é transparente para o cliente, pois diferenças entre os dois métodos de distribuição se restringem ao núcleo da rede; nas bordas da rede, a distribuição é sempre feita via IP, em *unicast*.

Os testes realizados com a rede protótipo demonstram que o sistema é capaz de melhorar significativamente o desempenho da distribuição de vídeo sob demanda no que diz respeito ao uso de banda ao delegar a tarefa de distribuição à rede CCN sobreposta à rede IP. Ele é especialmente eficiente na redução da carga na rede nas imediações dos servidores, pois propicia um isolamento entre a carga no núcleo da rede e a demanda percebida em suas extremidades. Essa eficiência é aumentada

quanto maior for o número de dispositivos NDN que a compõem. Isso incentiva uma implementação incremental de roteadores NDN. Como os roteadores NDN são capazes de rotear IP, a substituição dos roteadores é transparente para o resto da rede.

Os usuários têm acesso aos conteúdos disponibilizados através de pontos de conversão localizados nas extremidades da rede. Quanto mais próximos aos usuários se localizarem os pontos de conversão, mais eficiente a rede será e maior a economia de banda alcançada. Como a distribuição na última milha é feita via IP, não é necessária nenhuma modificação ou adaptação dos dispositivos dos usuários finais para que se tornem compatíveis com o CCN. Além disso, atualmente a proposta está restrita à implementação em redes de ISPs por limitações de escalabilidade da arquitetura CCN. Caso esses problemas de escalabilidade da arquitetura CCN sejam resolvidos e ela passe a ser o modelo de Internet vigente, a utilização de pontos de conversão permitiria resguardar o usuário de uma mudança abrupta.

6.1 Trabalhos Futuros

O sistema proposto foi avaliado em uma rede de testes. Sua avaliação levou em consideração apenas o consumo de banda gerado pela distribuição de um vídeo. Como trabalho futuro, pretende-se aumentar a rede e migrar as máquinas da rede virtual para diferentes ilhas do FITS a fim de avaliar se existe comprometimento da performance da distribuição via CCN quando se aumenta a escala da rede.

Outro ponto de desenvolvimento é a realização de medidas de desempenho variadas, como tempo de resposta, latência e queda de enlace. O desempenho do sistema também deve ser avaliado em relação à quantidade de conteúdos disponibilizados e a localização dos servidores na rede.

Referências Bibliográficas

- [1] JACOBSON, V., SMETTERS, D. K., THORNTON, J. D., *et al.*, “Networking named content”. In: *Proceedings of the 5th international conference on Emerging networking experiments and technologies*, pp. 1–12, ACM, 2009.
- [2] PENG, G., “CDN: Content distribution network”, arXiv preprint cs/0411069, 2004.
- [3] LEINER, B. M., CERF, V. G., CLARK, D. D., *et al.*, “A brief history of the Internet”, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, v. 39, n. 5, pp. 22–31, 2009.
- [4] MOREIRA, M. D., FERNANDES, N. C., COSTA, L., *et al.*, “Internet do futuro: Um novo horizonte”, *Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores-SBRC*, v. 2009, pp. 1–59, 2009.
- [5] ZHANG, L., ESTRIN, D., BURKE, J., *et al.*, *Named data networking (ndn) project*, Report NDN-0001, Xerox Palo Alto Research Center-PARC, 2010.
- [6] KOPONEN, T., CHAWLA, M., CHUN, B.-G., *et al.*, “A data-oriented (and beyond) network architecture”. In: *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, v. 37, pp. 181–192, ACM, 2007.
- [7] JOKELA, P., ZAHEMSZKY, A., ESTEVE ROTHENBERG, C., *et al.*, “LIP-SIN: line speed publish/subscribe inter-networking”. In: *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, v. 39, pp. 195–206, ACM, 2009.
- [8] CHERITON, D., GRITTER, M., *TRIAD: A New Next-Generation Internet Architecture*, Report, Stanford Computer Science Technical Report, july 2000.
- [9] CCNX, “CCNx Project”, 2011, Disponível em <http://www.ccnx.org/>.

- [10] SAROIU, S., GUMMADI, K. P., DUNN, R. J., *et al.*, “An analysis of internet content delivery systems”, *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, v. 36, n. SI, pp. 315–327, 2002.
- [11] JIANG, X., BI, J., *Named Content Delivery Network*, Report, Tsinghua University, 2012.
- [12] WANG, L., HOQUE, A., YI, C., *et al.*, *OSPFN: An OSPF based routing protocol for Named Data Networking*, Report, 2012.
- [13] TORRES, J. V., FERRAZ, L. H. G., DUARTE, O., “Redes orientadas a conteúdo baseadas em controladores hierárquicos”. In: *XXXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos-SBRC*, 2013.
- [14] STOICA, I., MORRIS, R., KARGER, D., *et al.*, “Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications”. In: *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, v. 31, pp. 149–160, ACM, 2001.
- [15] MERKLE, R. C., *Secrecy, authentication, and public key systems*. Ph.D. dissertation, Stanford, CA, USA, 1979. AAI8001972.
- [16] RIBEIRO, I. C., GUIMARÃES, F. Q., KAZIENKO, J. F., *et al.*, “Segurança em Redes Centradas em Conteúdo: Vulnerabilidades, Ataques e Contramedidas”, *Minicursos do XII Simpósio Brasileiro em Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais-SBSeg*, v. 2012, pp. 101–150.
- [17] NDN, “NDN Project”, 2010, Disponível em <http://named-data.net/>.
- [18] CONNECT, “CONNECT Project”, 2011, Disponível em <http://anr-connect.org/>.
- [19] NSF, “FIA Project”, 2010, Disponível em <http://www.nets-fia.net/>.
- [20] GHODSI, A., SHENKER, S., KOPONEN, T., *et al.*, “Information-centric networking: seeing the forest for the trees”. In: *Proceedings of the 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks*, p. 1, ACM, 2011.

- [21] WOLMAN, A., VOELKER, M., SHARMA, N., *et al.*, “On the scale and performance of cooperative Web proxy caching”, *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, v. 33, n. 5, pp. 16–31, 1999.
- [22] BRESLAU, L., CAO, P., FAN, L., *et al.*, “Web caching and Zipf-like distributions: Evidence and implications”. In: *INFOCOM’99. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, v. 1, pp. 126–134, IEEE, 1999.
- [23] JACOBSON, V., MOSKO, M., SMETTERS, D., *et al.*, “Content-centric networking”, *Whitepaper, Palo Alto Research Center*, pp. 2–4, 2007.
- [24] PERINO, D., VARVELLO, M., “A reality check for content centric networking”. In: *Proceedings of the ACM SIGCOMM workshop on Information-centric networking*, pp. 44–49, ACM, 2011.
- [25] GAREY, M. R., JOHNSON, D. S., *Computers and intractability*, v. 174. Freeman New York, 1979.
- [26] BARTAL, Y., “Probabilistic approximation of metric spaces and its algorithmic applications”. In: *Foundations of Computer Science, 1996. Proceedings., 37th Annual Symposium on*, pp. 184–193, IEEE, 1996.
- [27] JAMIN, S., JIN, C., JIN, Y., *et al.*, “On the placement of internet instrumentation”. In: *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, v. 1, pp. 295–304, IEEE, 2000.
- [28] BESTAVROS, A., RABINOVICH, M., “Topology-Informed Internet Replica Placement”, *Web Caching and Content Delivery*, p. 55, 2001.
- [29] QIU, L., PADMANABHAN, V. N., VOELKER, G. M., “On the placement of web server replicas”. In: *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, v. 3, pp. 1587–1596, IEEE, 2001.

- [30] KANGASHARJU, J., ROBERTS, J., ROSS, K. W., “Object replication strategies in content distribution networks”, *Computer Communications*, v. 25, n. 4, pp. 376–383, 2002.
- [31] FARINHA, D. M. M., “Arquitecturas de Rede para oferta de serviços de Vídeo a Pedido e IPTV”, 2008.
- [32] KORUPOLU, M. R., DAHLIN, M., “Coordinated placement and replacement for large-scale distributed caches”, *Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on*, v. 14, n. 6, pp. 1317–1329, 2002.
- [33] BARISH, G., OBRACZKE, K., “World wide web caching: Trends and techniques”, *Communications Magazine, IEEE*, v. 38, n. 5, pp. 178–184, 2000.
- [34] NS3, “NS3”, Disponível em <http://www.nsnam.org/>.
- [35] PIERRE, G., VAN STEEN, M., “Globule: a collaborative content delivery network”, *Communications Magazine, IEEE*, v. 44, n. 8, pp. 127–133, 2006.
- [36] FRANK, B., POESE, I., LIN, Y., *et al.*, “Pushing CDN-ISP Collaboration to the Limit”, *ACM SIGCOMM CCR*, v. 43, n. 3, 2013.
- [37] FRICKER, C., ROBERT, P., ROBERTS, J., *et al.*, “Impact of traffic mix on caching performance in a content-centric network”. In: *Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2012 IEEE Conference on*, pp. 310–315, IEEE, 2012.
- [38] GUIMARAES, P. H. V., FERRAZ, L. H. G., TORRES, J. V., *et al.*, “Experimenting content-centric networks in the future internet testbed environment”. In: *Workshop on Cloud Convergence, ICC*, 2013.
- [39] LEE, J., KIM, D., “Proxy-assisted content sharing using content centric networking (CCN) for resource-limited mobile consumer devices”, *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, v. 57, n. 2, pp. 477–483, 2011.
- [40] GTA, “FITS”, Disponível em <http://www.gta.ufrj.br/fits/>.