

Uma Abordagem para Reserva de Recursos no Gerenciamento de QoS entre Domínios em Redes de Próxima Geração

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação devidamente corrigida e defendida por Ricardo Batista Freitas e aprovada pela Banca Examinadora.

Campinas, 29 de junho de 2009.



Edmundo Roberto Mauro Madeira
Instituto de Computação - UNICAMP
(Orientador)

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

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

Bibliotecária: Maria Fabiana Bezerra Müller – CRB8 / 6162

Freitas, Ricardo Batista

F884a Uma abordagem para reserva de recursos no gerenciamento de QoS entre domínios em redes de próxima geração/Ricardo Batista Freitas -- Campinas, [S.P. : s.n.], 2009.

Orientador : Edmundo Roberto Mauro Madeira

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

1.Redes de computação - Gerência. 2.Garantia de qualidade. 3.Virtualização.. I. Madeira, Edmundo Roberto Mauro. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Computação. III. Título.

Título em inglês: An approach to inter-domain resource reservation for QoS management in next generation networks

Palavras-chave em inglês (Keywords): 1.Computer networks – Management. 2.Quality assurance. 3.Virtualization.

Titulação: Mestre em Ciência da Computação

Banca examinadora: Prof. Dr. Edmundo Roberto Mauro Madeira (IC – UNICAMP)
Prof. Dr. Maurício Ferreira Magalhães (FEEC - UNICAMP)
Profa. Dra. Islene Calciolari Garcia (IC – UNICAMP)

Data da defesa: 29/06/2009

Programa de Pós-Graduação: Mestrado em Ciência da Computação

TERMO DE APROVAÇÃO

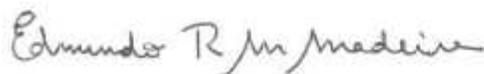
Dissertação Defendida e Aprovada em 29 de junho de 2009, pela Banca examinadora composta pelos Professores Doutores:



Prof. Dr. Maurício Ferreira Magalhães
FEEC / UNICAMP



Prof.ª. Dr.ª. Islene Calciolari Garcia
IC / UNICAMP



Prof. Dr. Edmundo Roberto Mauro Madeira
IC / UNICAMP

Uma Abordagem para Reserva de Recursos no Gerenciamento de QoS entre Domínios em Redes de Próxima Geração

Ricardo Batista Freitas¹

Junho de 2009

Banca Examinadora:

- Edmundo Roberto Mauro Madeira
Instituto de Computação - UNICAMP (Orientador)
- Maurício Ferreira Magalhães
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP
- Islene Calciolari Garcia
Instituto de Computação - UNICAMP
- Eleri Cardozo
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP (Suplente)
- Nelson Luis Saldanha da Fonseca
Instituto de Computação - UNICAMP (Suplente)

¹Suporte financeiro de: CAPES 2007–2009.

Resumo

A evolução tecnológica ocorrida nas últimas décadas proporcionou o acentuado crescimento da Internet, o surgimento de novos dispositivos capazes de conectarem-se a ela, como sensores e PDAs, e a criação de uma multitude de aplicações *online*. Esse novo cenário trouxe desafios muito distantes dos inicialmente considerados na criação da Internet, surgindo assim a necessidade de novas arquiteturas para atendê-los genuinamente: as Redes de Próxima Geração (*Next Generation Networks* (NGNs)). Com a crescente facilidade de acesso, a Internet tem ganhado uma importância cada vez maior na vida cotidiana e atividades como transações bancárias, jogos *online* e videoconferências têm demandado cada vez mais segurança, rapidez e largura de banda. Para assegurar essas características nas NGNs, o gerenciamento da qualidade de serviço (*Quality of Service* (QoS)) é essencial e terá que enfrentar grandes desafios como mobilidade, heterogeneidade de tecnologia e autonomia de nós e domínios. Visando abordar esse desafio, este trabalho apresenta uma estratégia para reserva de recursos no gerenciamento de QoS inter-domínios em Redes de Próxima Geração. Essa estratégia leva em conta a alta mobilidade esperada nas NGNs e propõe a reutilização de reservas para acelerar o restabelecimento da QoS após movimentações de nós ou redes. Para a implementação dessa estratégia, optou-se pela adaptação do *Virtual Topology Service*, o qual é um serviço que permite aos domínios divulgarem informações de QoS, através de topologias virtuais, e negociarem reservas de recursos independentemente da tecnologia que utilizarão para concretizar essas reservas. A estratégia proposta e sua implementação foram testadas em diferentes cenários de mobilidade em um protótipo de NGN real. A análise dos resultados dos testes mostrou que o reuso de reservas acelera a reserva de novos recursos e, conseqüentemente, o restabelecimento da qualidade de serviço esperada pelo usuário.

Abstract

The technological evolution that happened on the last decades fostered the steep growth of the Internet, the creation of new Internet capable devices, like sensors and PDAs, and the creation of a multitude of online applications. This new scenario brought challenges very different from those initially considered on the creation of the Internet, so emerged the need for new architectures that genuinely address them: the Next Generation Networks (NGNs). With continuously easier access, the Internet is becoming extremely important to our daily lives and activities like banking transactions, online games and videoconference are demanding more security, speed and bandwidth. In order to ensure these characteristics in NGNs, the quality of service (QoS) management is essential and will have to face great challenges like mobility, technology heterogeneity, and domain and node autonomy. Aiming to address these challenges, this work presents a strategy for resource reservation in inter-domain QoS management in Next Generation Networks. This strategy takes into account the high mobility expected in NGNs and proposes the reuse of reservations to speed up the QoS reestablishment after node or network movements. For the implementation of this strategy, we decided to adapt the Virtual Topology Service, which is a service that helps the domains to advertise QoS information, through virtual topologies, and to negotiate resource reservations independently from the technology they will use to enforce these reservations. The proposed strategy and its implementation were tested in different mobility scenarios over a real NGN prototype. The analysis of the test results showed that the reservation reuse accelerates the reservation of new resources and, consequently, the reestablishment of the QoS expected by the user.

Agradecimentos

Eu agradeço a Deus,
à minha família,
à minha Susana,
aos meus amigos,
aos colegas do mestrado, do LRC e do LCA,
ao prof. Edmundo Madeira pela orientação e apoio,
ao prof. Fábio Verdi pelas idéias e discussões,
ao prof. Maurício Magalhães por minha estadia no LCA,
e a todos que contribuíram para a minha caminhada até aqui.

Sumário

Resumo	vi
Abstract	vii
Agradecimentos	viii
1 Introdução	1
2 Conceitos Básicos	6
2.1 Redes de Próxima Geração	6
2.2 Mobilidade e QoS	8
2.3 Redes Ambientas	11
2.4 Protótipo de NGN	12
2.5 Virtual Topology Service	13
3 Trabalhos Relacionados	17
3.1 Trabalhos Relacionados às NGNs	17
3.2 Trabalhos Relacionados à QoS Inter-Domínios	18
3.3 Trabalhos Relacionados à Virtualização	19
4 Uma Nova Abordagem para Reserva de Recursos no Gerenciamento de QoS entre Domínios em Redes de Próxima Geração	21
4.1 Abordagem do Projeto AN para Divulgação de Informação de QoS entre Domínios	21
4.2 Uma Abordagem para Reutilização de Reservas no Gerenciamento de QoS entre Domínios	24
4.3 Arquitetura do NGNVTS	26
5 Implementação de um Protótipo do NGNVTS, Testes e Resultados	34
5.1 Implementação	34

5.2	Testes	37
5.2.1	Cenário 1: Movimentação do nó cliente	39
5.2.2	Cenário 2: Movimentação do nó destino	40
5.2.3	Cenário 3: Movimentação do domínio do nó cliente	41
5.2.4	Cenário 4: Movimentação do domínio do nó destino	41
5.3	Análise dos Resultados	43
6	Conclusão	47
	Bibliografia	50

Lista de Tabelas

5.1	Resultados para o Cenário 1.	40
5.2	Resultados para o Cenário 2.	41
5.3	Resultados para o Cenário 3.	42
5.4	Resultados para o Cenário 4.	42

Lista de Figuras

1.1	Crescimento dos <i>hosts</i> da Internet	1
1.2	Arrecadação e assinantes do serviço de acesso móvel à Internet pela Verizon Communications	2
2.1	Ambient Control Space: Interfaces e algumas Entidades Funcionais	12
2.2	Exemplo de Topologia do Protótipo.	14
2.3	Funcionamento típico do serviço de roteamento com QoS.	15
2.4	Obtenção de VTs no modelo <i>pull</i>	16
2.5	Divulgação de VTs no modelo <i>push</i> . Todos os domínios recebem todas as VTs.	16
4.1	Divulgação de SLSs com agregação	23
4.2	Exemplo de mobilidade durante sessão de vídeo <i>online</i>	25
4.3	Semelhanças entre uma SLS e uma VT.	27
4.4	Interação entre o NGNVTS e a Rede Ambiente	29
4.5	Topologia dos domínios no processo de reserva de recursos	30
4.6	Processo de reserva de recursos no NGNVTS	30
4.7	Topologia dos domínios no estabelecimento da nova reserva com reuso de reservas	32
4.8	Processo de estabelecimento da nova reserva com reuso de reservas no NGNVTS	33
5.1	Trecho do código do ACS que define a disponibilização de seus métodos. . .	35
5.2	Trecho do código do E2ENS que utiliza um método disponibilizado pelo ACS.	35
5.3	Estrutura de interação entre os serviços, o ACS e o protótipo de NGN. . .	36
5.4	Exemplo de VT utilizada nos testes.	39
5.5	Disposição de nós para o Cenário 1.	40
5.6	Disposição de nós para o Cenário 2.	40
5.7	Disposição de nós para o Cenário 3.	41
5.8	Disposição de nós para o Cenário 4.	42

5.9	Diferença de tempo entre as abordagens no Cenário 1.	43
5.10	Diferença de tempo entre as abordagens no Cenário 2.	44
5.11	Diferença de tempo entre as abordagens no Cenário 3.	44
5.12	Diferença de tempo entre as abordagens no Cenário 4.	45
5.13	Ganho de tempo da nova abordagem.	46

Capítulo 1

Introdução

As duas últimas décadas testemunharam o crescimento da Internet de forma sem precedentes. O número de *hosts* cresceu quase que exponencialmente nesse período [39], como mostrado na Figura 1.1. Enquanto a evolução tecnológica barateou os computadores e criou um conjunto crescente de dispositivos capazes de conectarem-se em rede, maciços investimentos em infraestrutura, como os ocorridos durante a “bolha da Internet” entre 1995 e 2001, tornaram o acesso a ela quase que ubíquo em boa parte do mundo. A Internet tornou-se tão grande e tão importante para a vida moderna que seu destino e desempenho possuem um enorme impacto na economia mundial.

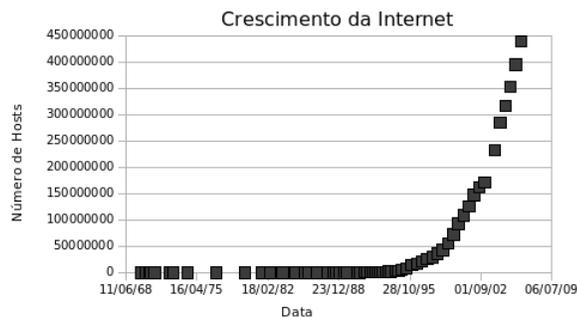


Figura 1.1: Crescimento dos *hosts* da Internet

Apesar de ter sido muito bem planejada e estar conseguindo suportar, sem mudanças estruturais significativas, um forte crescimento no número de *hosts* e domínios, a realidade tecnológica atual apresenta inúmeros e diversos desafios à Internet. O desenvolvimento da tecnologia sem-fio, por exemplo, trouxe um conceito novo: a mobilidade. Além da Internet continuar a expandir-se, seus integrantes, agora, podem mover-se: uma mesma pessoa em um mesmo aparelho (*notebook*, por exemplo) vai acessá-la a partir de diferentes localidades. O impacto conceitual da mobilidade sobre o funcionamento da Internet é

muito grande pois o roteamento de informações baseia-se no IP que é ao mesmo tempo localizador e identificador de um nó. Com a mobilidade, essas duas características tornam-se separadas porque apesar da identidade de um *host* permanecer a mesma durante a movimentação, seu localizador mudará. Dessa forma, o número crescente de aparelhos móveis, como PDAs, carros e *notebooks*, e a expressividade e crescimento do mercado de acesso móvel à Internet (por exemplo, a Verizon Communications, a segunda maior operadora de telefonia celular dos EUA, obteve um aumento sucessivo na arrecadação e no número de assinantes desse serviço nos últimos anos [29], como mostrado na Figura 1.2) tornaram o suporte genuíno à mobilidade um desafio cada vez mais urgente para a contínua evolução da Internet.

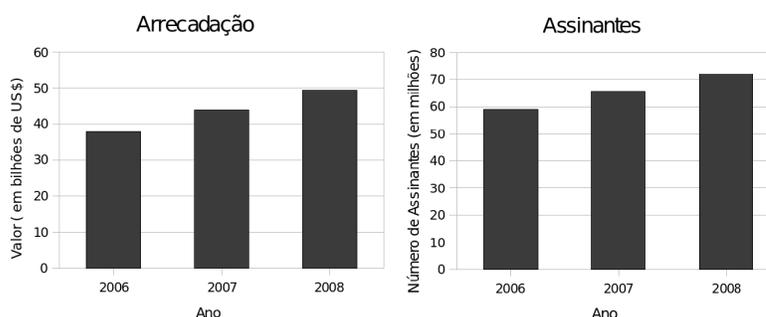


Figura 1.2: Arrecadação e assinantes do serviço de acesso móvel à Internet pela Verizon Communications

Acompanhando a mudança tecnológica veio a mudança comportamental. Com o poder computacional dos novos dispositivos, veio o desejo de criar redes independentes. Um conjunto de *notebooks* jogando em rede, um grupo de PDAs sincronizando as agendas dos trabalhadores ou os sensores de uma residência trocando informações sobre os diversos alarmes são cenários que vêm se tornando cada vez mais comuns. Essas redes independentes possuem características e limitações bem diferentes das de uma LAN cabeada formada por *desktops* em um escritório. Essas diferenças são tão significativas que os protocolos utilizados por essas novas redes precisam ser preparados para lidar com questões como economia de energia, qualidade do sinal e capacidade de armazenamento. Sendo assim, a integração de diferentes tecnologias e protocolos tornou-se um desafio para a Internet.

Com o objetivo de atender a esses e outros desafios, novos paradigmas e arquiteturas de rede têm sido criados e chamados de Redes de Próxima Geração (*Next Generation Networks* (NGNs)) [34] ou Internet do Futuro. Segundo a *International Telecommunication Union - Telecom Standardization Sector* (ITU-T), uma NGN é uma rede baseada em pacotes capaz de utilizar múltiplas tecnologias de banda larga e qualidade de serviço e de prover suporte à mobilidade generalizada possibilitando aos usuários o acesso irrestrito e

ubíquo às redes e serviços. Apesar de cada NGN propor soluções independentes visando um conjunto de desafios, muitas soluções possuem paradigmas em comum. Por exemplo, para dar suporte à mobilidade, muitas NGNs optam pela separação entre identificador e localizador [32, 7], enquanto que outras, para integrar diferentes tecnologias, atribuem aos gateways inter-domínios a função de tradutores de tecnologia [14, 1]. Um outro desafio abordado pelas NGNs é a integração dos domínios (redes) não só do ponto de vista tecnológico mas também do ponto de vista gerencial. Nesse sentido as Redes Ambiente (*Ambient Networks* (ANs)) [1] visam prover melhores serviços aos usuários através da melhor integração entre os serviços oferecidos por diferentes domínios. Uma Rede Ambiente pode ser vista como um ou mais nós, móveis ou estáticos, com as funções de gerência concentradas em um *Ambient Control Space* (ACS). A integração almejada pelas ANs tem como base o conceito de composição de redes. Através da interação entre seus ACSs, duas ou mais redes compõem-se para compartilhar seus recursos e serviços, podendo compartilhar também o gerenciamento dos mesmos, e ampliar a diversidade e qualidade das funcionalidades (“assets”) à disposição de seus usuários. Em um exemplo típico de composição, o PDA (que, apesar de único, é visto também como uma Rede Ambiente) de um usuário compõe-se com a rede de um trem para oferecer a seu usuário acesso à Internet com melhor qualidade, uma vez que a largura de banda do enlace do trem é maior. Durante a viagem, em uma das paradas, a rede do trem percebe que a rede da estação oferece um acesso à Internet por custo mais baixo do que seu atual acesso por 3G. Então, a rede do trem compõe-se com a da estação e todos os usuários do trem, inclusive o usuário do PDA, pagam agora um custo menor pelo acesso à Internet. A composição das redes ocorreu de modo transparente para seus usuários e resultou em sucessivas melhorias da qualidade dos serviços oferecidos a eles.

Acompanhando o desenvolvimento do hardware (computadores e dispositivos), as aplicações tornaram-se mais complexas e diversas, abrangendo não só tarefas de escritório como também entretenimento através de vídeos, músicas e jogos. Com a facilidade de acesso à Internet, muitas aplicações e serviços têm sido integrados à Rede como jogos *online* e vídeos sob demanda, e até mesmo aplicativos de escritório como editores de texto e planilhas, historicamente “locais”, agora estão disponíveis completamente *online* através da “computação nas nuvens” [28]. Esses aplicativos possuem diferentes expectativas em relação à qualidade da comunicação oferecida através da Internet: os vídeos sob demanda, por exemplo, requerem boa largura de banda e baixo *jitter* enquanto que os jogos *online* e conversas com áudio requerem pequeno atraso. Essas expectativas são muito diferentes das originalmente consideradas na concepção da Internet e o modelo “best effort” atualmente adotado para encaminhamento de pacotes torna difícil a garantia de algumas características da comunicação.

Consequentemente, algumas estratégias foram desenvolvidas para tentar garantir a

qualidade de comunicação, ou Qualidade de Serviço (*Quality of Service* (QoS)), esperada pelas novas aplicações. A estratégia mais simples para tal é o “*over provisioning*”, que consiste em super-dimensionar a rede de modo a não haver escassez de recursos. Um tipo de “*over provisioning*” seria dimensionar a rede considerando que cada usuário vai estar sempre utilizando a capacidade máxima disponível a ele (por exemplo, largura de banda). Com isso, garante-se que nenhum usuário terá a qualidade de seu serviço prejudicada em prol da qualidade do serviço de outro. Entretanto, essa estratégia gera um grande desperdício de recursos uma vez que a grande maioria dos usuários não utiliza a rede ininterruptamente. Além disso, mesmo com “*over provisioning*” a qualidade de serviço oferecida pela rede pode não ser a esperada. Isso pois alguns algoritmos de encaminhamento de pacotes dão preferência a utilizar, por exemplo, enlaces com maior largura de banda o que, quando várias transmissões são direcionadas a eles, pode gerar a sobrecarga desses enlaces. Assim, a rede ficaria com focos móveis de congestionamento mesmo tendo parte dos recursos livre.

Uma outra estratégia para garantir a qualidade da comunicação é a reserva de recursos. Nela, determinados tráfegos, provenientes de nós que realizaram uma reserva, são marcados e priorizados durante o encaminhamento. Dessa forma, garante-se a qualidade do serviço para os nós que realizaram reservas. A principal desvantagem das tecnologias atuais para a reserva de recursos, como *Multiprotocol Label Switching* (MPLS) e *DiffServ*, é a restrição a determinados domínios. Para que a reserva de recursos possa ocorrer em um determinado caminho de comunicação, é necessário que todos os domínios naquele caminho utilizem a mesma tecnologia de reserva. Como cada domínio possui realidades econômicas e administrativas diferentes, é muito difícil que vários domínios concordem em relação à tecnologia que utilizarão. Sendo assim, atualmente, na prática, a reserva de recursos pode ser realizada intra-domínio, o que só atende uma pequena parte do tráfego da Internet, dado que a maioria dele atravessa alguns *Autonomous Systems* (domínios).

Para manter a independência dos domínios, permitindo que escolham livremente sua tecnologia de reserva de recursos, e ao mesmo tempo possibilitar a garantia da qualidade de serviço na comunicação fim-a-fim, atravessando vários domínios, é necessária a separação entre o gerenciamento da QoS (*QoS management*) e a implementação da QoS (*QoS enforcement*). Dessa forma, o gerenciamento da QoS pode ser comum a todos os domínios possibilitando-se que sejam reservados recursos em diversos domínios diferentes, enquanto que a implementação das reservas (o *QoS enforcement*) em cada domínio é independente. Baseado nesse paradigma surgiu o *Virtual Topology Service* (VTS) (Serviço de Topologia Virtual) que além de separar o gerenciamento e a implementação da QoS utiliza topologias virtuais (*Virtual Topologies* (VTs)) para a divulgação de informação dos recursos da rede de cada domínio. A Topologia Virtual permite que um conjunto de enlaces e nós seja representado por um nó ou enlace virtual possibilitando, assim, que o domínio regule

o grau de detalhes das informações a serem divulgadas sem prejudicar sua relevância.

Sendo assim, esse trabalho visa estudar a criação e utilização de um novo *Virtual Topology Service*: o *Next Generation Network Virtual Topology Service* (NGNVTS) para provimento de QoS inter-domínios em Redes de Próxima Geração. O VTS foi inicialmente testado em redes ópticas e redes IP, dessa forma, o NGNVTS precisará lidar com algumas características diferentes das NGNs, como a ausência da tabela do *Border Gateway Protocol* (BGP) e a alta mobilidade de nós e redes. Para melhorar o desempenho do NGNVTS frente à alta mobilidade das NGNs, esse trabalho apresenta uma estratégia de reutilização de reservas para acelerar o estabelecimento de novas reservas quando da movimentação de um nó ou rede. Para testar a implementação do NGNVTS e a estratégia de reutilização de reservas, optou-se por utilizar um protótipo, ao invés de simulação, para que fossem estudadas as dificuldades de implementação e integração do serviço a uma rede tão nova e pouco implementada como as NGNs. O protótipo de NGN utilizado para os testes foi desenvolvido na FEEC/Unicamp e foi escolhido por dar suporte à mobilidade de nós e de domínios. Para facilitar a integração entre o NGNVTS e o protótipo, algumas funções de gerência que não são atualmente oferecidas pelo protótipo, mas são esperadas em futuras NGNs, foram implementadas em um ACS transformando, assim, cada computador em uma Rede Ambiente.

As principais contribuições desse trabalho são a proposta de uma estratégia de reutilização de reservas de recursos para acelerar o restabelecimento de novas reservas após eventos de mobilidade, a implementação desta estratégia através da criação do NGNVTS, adaptado à realidade das NGNs e, por fim, a análise dos resultados do teste de ambas (a proposta e a implementação do NGNVTS) em diferentes cenários de mobilidade sobre uma Rede Ambiente, tendo como infraestrutura um protótipo de NGN [13, 37].

O restante dessa dissertação está organizado da seguinte forma: o próximo capítulo apresenta alguns conceitos básicos sobre mobilidade e QoS, NGNs, Redes Ambientes, o protótipo de NGN utilizado e o VTS. O Capítulo 3 comenta alguns trabalhos relacionados às NGNs, ao gerenciamento de QoS e à virtualização. O Capítulo 4 detalha a proposta deste trabalho e as principais características e o funcionamento do NGNVTS. O Capítulo 5 discorre sobre a implementação de um protótipo do NGNVTS e a validação da proposta além de apresentar os resultados dos testes e suas análises. Por fim, o Capítulo 6 traz as conclusões e os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Conceitos Básicos

Este capítulo apresenta, brevemente, conceitos relevantes ao projeto começando com mobilidade e QoS, seguidas por alguns princípios das Redes de Próxima Geração e Redes Ambientais. Então, o protótipo de NGN, usado nos testes, é descrito. Finalmente, o VTS será explicado e seus módulos detalhados.

2.1 Redes de Próxima Geração

Nos últimos anos, a evolução da tecnologia aumentou o número de dispositivos capazes de conectarem-se em redes e, juntamente com a evolução da tecnologia sem-fio, o acesso à Internet tornou-se ubíquo. Com essa crescente facilidade de acesso, as aplicações *online* têm-se tornado cada dia mais diversas visando atender a uma parcela cada vez maior das atividades da vida cotidiana. Dessa forma, o uso da Internet passou de uma simples consulta de páginas para uma multitude de ações como compras, conferências, monitoramento de residências, jogos, entretenimento, entre outras. Essa diversidade de aplicações e dispositivos vêm trazendo importantes demandas como segurança para transações (compras) *online*, suporte à mobilidade para assistir um vídeo *online* durante uma viagem de metrô, e suporte a diferentes tecnologias para que um PDA possa monitorar remotamente os sensores presentes em uma residência. Para atender requisitos tão distantes do objetivo inicial em sua concepção, a Internet vem sendo amplamente estudada e novas arquiteturas têm sido propostas criando o conceito de Redes de Próxima Geração (*Next Generation Networks* - NGNs). As Redes de Próxima Geração visam atender genuinamente essas novas demandas através de novas arquiteturas e novos paradigmas geralmente sem desconsiderar toda a infraestrutura atual da Internet e o imenso número de aplicações para ela desenvolvida.

Para atender cada um desses novos requisitos, as arquiteturas propostas trazem diferentes abordagens que, muitas vezes, possuem alguns conceitos em comum. O suporte à

mobilidade, por exemplo, tem como seu conceito básico a separação entre identificador e localizador, evitando a sobrecarga semântica que ocorre com o IP. Com essa separação, a conexão estabelecida na camada de transporte entre identificadores mantém-se válida mesmo quando uma das extremidades troca de localizador devido a um movimento, por exemplo, indo para outro domínio. Dessa forma, uma aplicação de transferência de arquivos nem perceberia o movimento de um dos nós e a transferência seria temporariamente suspensa, como em uma oscilação natural da rede, durante o processo de *handover* mas continuaria assim que este estivesse concluído. Um dos principais desafios da abordagem de separação entre localizador e identificador é a descoberta do localizador atual de um nó, dado que este pode sempre mudar. Enquanto uma abordagem mais tradicional utiliza os conceitos de *home-address* e *care-of-address*, para que haja sempre um ponto de partida para a descoberta do localizador, as NGNs têm investido em buscas globais. A busca global tem a grande vantagem de não necessitar manter um *home-address* constantemente atualizado mas enfrenta o desafio da descoberta de um nó em tempo hábil em meio a uma rede imensa e em constante expansão. De forma geral, as buscas globais utilizam algum tipo de estrutura distribuída como um conjunto de servidores ou roteadores especiais formam uma rede e guardam informações de todos os nós registrados atualmente neles. Dessa forma, quando um nó tenta comunicar-se com outro, o roteamento leva a requisição até um desses servidores/roteadores que, por sua vez, comunica-se com os outros para descobrir o localizador atual do nó destino e completar a comunicação. Analisando-se essa estratégia, percebe-se que a quantidade de informações armazenadas por um servidor/roteador e a velocidade da atualização dessas informações, quando de um movimento de um nó ou rede, são pontos cruciais para seu sucesso.

Quanto à segurança, a mobilidade e a separação entre localizador e identificador trouxeram grandes desafios. No modelo tradicional, a identidade de um nó está associada a sua localização, como ocorre com o IP. Sendo assim, para que um nó possa receber as mensagens encaminhadas a determinada “identidade”, ele precisa estar naquela localização específica, ou seja, estar com aquele IP. Ao separar o localizador do identificador e permitir a mobilidade dos nós, permite-se também que a qualquer momento um nó, em qualquer lugar, declare possuir determinada “identidade” e possa, assim, receber as mensagens encaminhadas a ela. Dessa forma, tornou-se essencial a existência de um método de autenticação, ou seja, verificação de identidade. Por exemplo, a arquitetura Node ID [10], uma das NGNs que serviu de inspiração para o protótipo utilizado nos testes, utiliza uma chave pública e uma privada para possibilitar a identificação de um nó. A chave pública pode ser vista como o “identificador” que é divulgado e pelo qual pode ser feito o roteamento de mensagens, enquanto que a chave privada seria a “identidade” do nó. Sendo assim, toda mensagem é cifrada com a chave pública do nó destino antes de ser enviada. Com a mensagem cifrada pela chave pública, ainda que um nó impostor capturasse-a,

ele não conseguiria decifrá-la, o que só seria possível com a respectiva chave privada. As chaves públicas e privadas podem também ser utilizadas na autenticação de um nó para dar-lhe acesso a determinada rede ou serviço. Em uma rede de acesso restrito, um nó para provar sua identidade pode enviar uma mensagem cifrada por sua chave privada ao gerente da rede que vai tentar decifrá-la com a chave pública da identidade com a qual o nó apresentou-se. Dessa forma, se o deciframento da mensagem for correto, significa que o nó possui a chave privada da identidade com a qual se apresentou, ou seja, ele é quem diz ser. Logo, ser-lhe-á dado acesso à rede em questão. Com essas estratégias, pode-se dar suporte a mobilidade de nós sem comprometer a segurança das comunicações.

Em relação ao suporte a diferentes tecnologias, o desafio é ainda maior. Atualmente, os dispositivos capazes de conectarem-se em redes são tão diversos quanto numerosos. Uma rede de sensores em uma floresta monitorada enfrenta limitações de energia e comunicação bem diferentes de uma rede veicular ou de um conjunto de notebooks e PDAs em uma rede *ad-hoc* montada pelos grupos de resgate no local de um acidente. Dessa forma, é esperado que cada situação utilize os protocolos e endereçamentos que otimizem o desempenho de suas tecnologias em relação à qualidade da comunicação, economia de recursos e tolerância a falhas. Sendo assim, algumas NGNs tentam permitir que cada domínio (por exemplo, os sensores agrupados em uma rede) utilize um protocolo de camada 3 independente e, ainda assim, consigam comunicar-se. Por exemplo, a Node ID e a TurfNet [14], uma NGN que promove a composição de redes e dá suporte à mobilidade de nós, possibilitam a heterogeneidade de protocolos da camada 3 através da utilização dos *gateways* entre os domínios para realizar a tradução entre as tecnologias. Em outras palavras, os *gateways* inter-domínios são responsáveis por “re-empacotar” as informações recebidas antes de encaminhá-las a um domínio que possui protocolo diferente do seu. Essa estratégia também aproveita-se da separação entre identificador e localizador mas coloca um problema ainda maior uma vez que não basta descobrir o localizador atual de um nó porque as mensagens não podem ser roteadas através daquele localizador já que atravessará domínios com protocolos distintos. As mensagens precisam ser roteadas pelo identificador, que é independente das tecnologias dos domínios, até alcançarem o domínio final podendo, então, ser roteadas pelo localizador do nó destino. Dessa forma, a estrutura distribuída formada por servidores/roteadores fica responsável por auxiliar no roteamento através do identificador enquanto que cada domínio fica responsável pelo mapeamento entre os identificadores e localizadores de seus nós.

2.2 Mobilidade e QoS

Como mencionado na Introdução, o número de aparelhos móveis está crescendo e o acesso móvel à Internet tornou-se um mercado extremamente expressivo e em expansão. Junta-

mente a esse movimento, as aplicações têm-se tornado mais complexas e dependentes da Internet, quer seja para acessar um conteúdo atualizado constantemente, para possibilitar colaborações remotas ou mesmo para jogar. Essa dependência, por sua vez, também tem evoluído e demanda uma melhor qualidade da comunicação através da Internet requerendo, por exemplo, que determinada largura de banda seja atendida ou que o atraso não ultrapasse um dado limite. O provimento desta qualidade de serviço em uma rede fixa já é um grande desafio dadas a quantidade e diversidade de domínios e tecnologias da Internet e torna-se um desafio ainda maior quando precisa lidar com a mobilidade.

O primeiro desafio a ser abordado pela QoS em conjunto com a mobilidade é o processo de *handover*. Como esse processo inclui a troca de informações de gerenciamento para o ajuste do aparelho móvel à nova antena, a comunicação principal fica, geralmente, prejudicada. Algumas estratégias, como o *Hierarchical Mobile IPv6* (HMIPv6) [4], visam diminuir o tempo do processo de *handover* e, conseqüentemente, a perda de pacotes. O HMIPv6 é uma evolução do *Mobile IPv6* (MIPv6) e tem como principal característica a separação da mobilidade em macro-mobilidade (“*inter-sites*”) e micro-mobilidade (“*intra-site*”). Em [4], um “*site*” pode ser a rede de um ISP, a de uma companhia, um conjunto de LANs ou mesmo uma LAN. De forma geral, o HMIPv6 cria dois tipos de “*care of address*”: o *Virtual Care of Address* (VCoA), visível globalmente, e o *Private Care of Address* (PCoA), visível localmente (*intra-site*). Se um nó N move-se localmente mudando, por exemplo, o ponto de acesso dentro da mesma rede, somente o seu PCoA sofre atualização, a qual é propagada localmente. Em relação ao MIPv6 que sempre efetua uma atualização global, a atualização local gerada pelo HMIPv6 resulta em uma economia de tempo, já que a sinalização local é mais rápida do que a global, e de recursos, uma vez que a sinalização não terá que atravessar a Internet até os nós que estão comunicando-se com N. A partir daí, os nós locais comunicando-se com N utilizarão o novo PCoA, enquanto que os nós externos ao *site* continuarão a utilizar o VCoA, o qual não sofreu alteração. Entretanto, quando N move-se para um outro *site*, seu VCoA e PCoA mudarão gerando uma atualização global com tempo e consumo de recursos semelhantes aos que ocorreria no MIPv6.

Um outro ponto importante para a qualidade de serviço em redes móveis é a tecnologia de acesso. Cada tecnologia, por exemplo WiMax, 802.11, 3G, possui uma cobertura própria com características próprias como largura de banda, atraso e interferência. Além disso, de forma geral, quanto maior a cobertura da tecnologia menor a qualidade do sinal e a frequência dos *handovers*. Com tantas variáveis, o desempenho das tecnologias de acesso pode variar grandemente em alguns contextos. Com a diminuição dos custos dos periféricos, alguns dispositivos passaram a ter mais de uma tecnologia de acesso à sua disposição podendo, então, escolher a que melhor adequa-se a um dado contexto dando, assim, origem ao gerenciamento multi-rádio (*Multi-Radio Resource Management*

(MRRM)). Esse gerenciamento visa otimizar a escolha da tecnologia de acesso (*Radio Access Technology* (RAT)) a ser utilizada pelo dispositivo de modo a melhorar a eficiência dos recursos, a cobertura e, por fim, a qualidade de comunicação sentida pelo usuário. Em [31], uma estratégia de MRRM para Redes Ambientais é apresentada e avaliada em relação à forma de utilização de RATs e aos algoritmos de seleção de rádio considerando-se, por exemplo, tipo de informação que utilizarão e que fator, como consumo de cada usuário ou carga da rede, tentarão otimizar. Apesar de em [31] não ser apresentado um amplo estudo das estratégias de utilização de RATs, é mencionado que elas vão além da escolha da melhor tecnologia de acesso em dado momento. Um mesmo dispositivo pode utilizar mais de uma RAT simultaneamente para obter uma qualidade de serviço ainda maior. Uma das formas de uso de RATs em paralelo é a separação por fluxo, na qual cada fluxo de um usuário pode ser alocado a um rádio diferente. Por exemplo, para um usuário em trânsito, a transferência de arquivos pode ser designada à 802.11, que possui maior largura de banda, enquanto que a conversa por áudio pode ser atribuída à UMTS, que possui menor largura de banda mas maior cobertura necessitando, assim, de menos *handovers*, os quais possuem um impacto substancial em aplicações de tempo real como a conversa por áudio. A utilização de RATs em paralelo pode proporcionar também maior robustez para a comunicação se um mesmo fluxo for enviado por duas tecnologias diferentes, o que pode ser muito útil para aplicações com altas restrições de QoS. A diversidade de RATs traz melhoras não só para os usuários individualmente mas para a rede como um todo. Por exemplo, através da coordenação da RAT dos usuários, a rede consegue compensar a sobrecarga de determinada tecnologia migrando os usuários mais adequados, de acordo com critérios como tipo de tráfego ou recursos disponíveis (por exemplo, bateria), para outra mantendo, assim, a taxa global de satisfação dos usuários.

Uma outra abordagem para melhoria da QoS em redes móveis distancia-se das questões físicas para aproximar-se de questões comportamentais. Apesar da total liberdade que os dispositivos móveis possuem, os seres humanos, de forma geral, têm hábitos e regularidades em suas movimentações mais corriqueiras. Quer seja indo para o trabalho diariamente, indo à uma lanchonete semanalmente ou visitando os pais em outra cidade uma vez por mês, a maioria das pessoas manterá uma rotina de movimentações e de conexões e usos da Internet. Sendo assim, através do estudo desses hábitos, pode-se efetuar um melhor dimensionamento e gerenciamento dos recursos de uma rede (por exemplo, acionando mais pontos de acesso em determinados locais e horários) ou realizar uma reserva de recursos prévia ao deslocamento de um usuário de modo a garantir que determinada largura de banda para seu vídeo ou atraso máximo para sua conversa de áudio sejam atendidos no seu novo destino. Apesar dessa estratégia não garantir a constância na QoS sentida pelo usuário, uma vez que ela não aborda o processo de *handover*, ela acelera o restabelecimento da QoS percebida pois os recursos já estarão disponíveis ao usuário

tão logo o processo de *handover* seja concluído. Em [27], a mobilidade dos usuários é estudada levando-se em consideração as “órbitas sociais”. Nesse trabalho, um “*hub*” é uma abstração para uma localidade importante no modelo da rede, por exemplo um prédio em um campus ou um andar em um edifício. Os “*hubs*” visitados por um usuário em determinado período são associados a probabilidades de visita, baseadas nas frequências das mesmas, para formar um “perfil de mobilidade”. Por exemplo, se um determinado aluno costuma visitar o laboratório, a biblioteca e uma sala de aula nos dias em que vai à faculdade, estes locais farão parte do seu perfil de mobilidade “estudantil”. Se ao ir ao *shopping* nos fins de semana, esse mesmo aluno costuma visitar uma dada livraria e uma lanchonete, elas farão parte de seu perfil de mobilidade “casual”. Para os autores de [27], a mobilidade de um usuário pode ser modelada utilizando-se as órbitas *inter-hubs* (a relação entre os *hubs* visitados por um dado usuário) e as órbitas *inter-perfis* (a combinação dos perfis que um usuário exibe por um dado período). Através dessa modelagem, os autores propõem métodos para predição da localização de um usuário, dado o seu perfil de mobilidade atual, e para predição do padrão de visitação de um dado “*hub*”, dado seu histórico de visitas para um determinado período.

Uma evolução da abordagem de reserva prévia de recursos, mencionada acima, tenta diminuir o impacto do processo de *handover* através do uso de *caches*. Nessa nova estratégia apresentada em [22], os hábitos dos usuários são também estudados para prever sua movimentação e sua sessão atual é copiada para seus prováveis destinos antes do *handover*. Uma vez concluído o processo de cópias da sessão atual, as informações transmitidas a um usuário são também direcionadas às suas múltiplas sessões nos prováveis destinos e armazenadas em *caches*. Dessa forma, quando a movimentação do usuário ocorrer, as informações perdidas durante o processo de *handover* estarão disponíveis no *cache* da sessão do destino escolhido e poderão ser recuperadas. Em seguida, as sessões nos destinos não escolhidos são descartadas. Apesar dessa abordagem não garantir a constância da comunicação (envio e recebimento de informações) muito importante para usos de tempo real, como uma conversa de áudio, essa estratégia evita a perda das informações que seriam recebidas durante o *handover*, melhorando assim a qualidade sentida pelo usuário ao assistir um vídeo ou efetuar o *download* de um arquivo, por exemplo.

2.3 Redes Ambientes

Um dos mais relevantes projetos no contexto de Redes de Próxima Geração é o projeto Redes Ambientes (*Ambient Networks* (ANs)). Ele explora soluções para redes móveis em ambientes dinâmicos formados por redes heterogêneas.

Um dos princípios fundamentais das Redes Ambientes é a composição, é através dela que as redes são formadas (composição entre duas redes unitárias), expandidas e, muitas

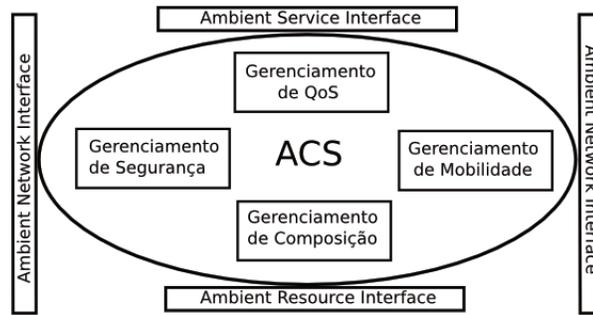


Figura 2.1: Ambient Control Space: Interfaces e algumas Entidades Funcionais

vezes, interagem. Dessa forma, um espaço de controle unificado é necessário entre duas ou mais ANs para possibilitar o controle transparente de características como mobilidade, heterogeneidade e segurança. Este espaço de controle é definido, no projeto de Redes Ambientes, como *Ambient Control Space* (ACS). No ACS, as funções de controle estão divididas, de acordo com seus objetivos, em Entidades Funcionais (*Functional Entities* (FEs)) e podem ser acessadas através de três interfaces: *Ambient Service Interface* (ASI), *Ambient Resource Interface* (ARI) e *Ambient Network Interface* (ANI). A ASI é utilizada pelas aplicações e serviços para acessar funções como *naming*, localização, gerenciamento de contexto e engenharia de tráfego. Por sua vez, a ARI é acessada pelos recursos de conectividade (dispositivos) para usar funções como gerência de multirádio e processos de mobilidade. Finalmente, a ANI possibilita a comunicação entre ACSs de diferentes domínios, viabilizando a integração dos mesmos. Na Figura 2.1, estão ilustrados o Espaço de Controle (ACS), suas interfaces e algumas Entidades Funcionais, como o gerenciamento de QoS e o gerenciamento de mobilidade.

2.4 Protótipo de NGN

Com o objetivo de prover uma melhor análise da abordagem de gerência de QoS apresentada neste trabalho, optou-se por testá-la em uma NGN real, ao invés de em um simulador. Durante a pesquisa por tal NGN, encontrou-se o protótipo [37] que vem sendo desenvolvido na Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da UNICAMP. Este protótipo foi iniciado em 2006 com um projeto de mestrado [38] tendo por objetivo prover suporte genuíno à mobilidade, heterogeneidade e segurança e baseando-se em diversas idéias da literatura, como a Arquitetura Node ID [10] e HIP [32]. Ele continua a ser desenvolvido, por exemplo, com a incorporação de novos conceitos como o *Domain Identifier* apresentado em [13]. Além disso, o protótipo vem sendo continuamente testado em cenários de Internet futura, como composição de redes [5] e mobilidade entre redes de acesso.

O protótipo adota um espaço de identidade global (também conhecido como Camada de Identidade) e não requer endereçamento nem protocolo de camada 3 globais. O novo espaço de identidade global fica entre o espaço de nomes e o espaço de endereço de rede consequentemente separando identificadores de localizadores. Ao invés de mapear os nomes diretamente em endereços de redes, como no DNS da Internet, a arquitetura adota dois espaços comuns para possibilitar a comunicação entre domínios: o espaço de nomes e o espaço de identidade. Dessa forma, um nome é mapeado, inicialmente, em uma identidade. Então, um segundo mapeamento, realizado dinamicamente, associa a identidade a um endereço de rede, o qual é utilizado para encaminhamento na camada de rede. A arquitetura gerencia os espaços globais de nome e de identidade, ao passo que o espaço de endereço de rede é local a cada rede individual e autônoma (domínio).

Como definida na Arquitetura Node ID, a visão atual da Internet é simplificada ao considerar a existência de um núcleo no topo com domínios ligados à sua borda, formando uma árvore. Diferentemente do núcleo, esses domínios são considerados dinâmicos e heterogêneos.

Como no HIP e na Node ID, cada nó no protótipo possui um identificador (*Node Identifier* (NID)) global e único. Para o protótipo, cada domínio também possui um identificador global e único: *Domain Identifier* (DID). Cada domínio possui um roteador *Domain ID* (*DID router* (DR)) que é responsável pela comunicação com outros domínios, efetuando a tradução entre diferentes tecnologias quando necessário. No protótipo, o roteamento realiza-se da seguinte maneira: cada DR propaga o DID dos domínios inferiores (mais distantes do núcleo) e do seu próprio domínio ao próximo DR a caminho do núcleo. Quando essa propagação alcança o respectivo *Core DID Router* (CDRs são DRs ligados ao núcleo), o CDR coloca seu localizador e o DID em um mecanismo distribuído no núcleo. Ao fazer isso, o CDR identifica-se como responsável por aquela árvore onde o domínio, representado pelo DID, está ligado. Os pacotes de dados são endereçados a um determinado NID/DID. Sendo assim, o roteamento, inicialmente, considera o DID e, quando o pacote alcança o domínio de destino, o NID é analisado. Como os domínios são identificados sem qualquer relação à árvore à qual estão ligados, eles podem mover-se de uma árvore para outra e ainda permanecerem alcançáveis. A Figura 2.2 apresenta um exemplo de topologia composto por um núcleo e duas árvores, compostas por três domínios cada.

2.5 Virtual Topology Service

O conceito *Virtual Topology* (VT) [20], ou Topologia Virtual, é uma abstração da topologia de um domínio na qual enlaces e nós reais, ou seus agrupamentos, podem ser representados como enlaces e nós virtuais ou simplesmente omitidos da VT. Na Topologia Virtual,

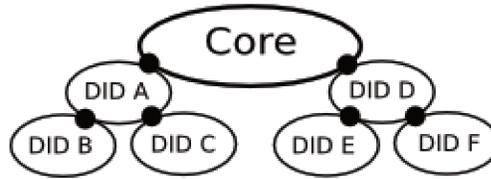


Figura 2.2: Exemplo de Topologia do Protótipo.

cada enlace ou nó virtual pode ser associado a características que representem informações reais (como a largura de banda e atraso de um determinado enlace ou o poder de processamento de um determinado nó) ou informações processadas (como a largura de banda mínima em um conjunto de enlaces formando um caminho representado por um único enlace virtual). Essa flexibilidade em relação às informações que podem ser associadas aos enlaces e nós virtuais transforma a VT em uma boa opção para a divulgação de informações entre domínios uma vez que permite a cada um deles regular o nível de detalhes e o tipo de informação que serão divulgados. Como a relevância de um determinado tipo de informação sobre uma rede depende do contexto no qual essa rede será utilizada (por exemplo, informação sobre atraso é mais importante para uma conversa com áudio enquanto informação sobre largura de banda é mais importante para a transmissão de arquivos), um domínio pode ter várias VTs, cada uma com informações adequadas para um determinado uso de sua rede.

O *Virtual Topology Service* (VTS) [20] faz parte de um serviço que visa oferecer roteamento com QoS entre domínios através do uso de VTs e com escolha de caminho na fonte. O VTS efetua a interação entre domínios para a obtenção e divulgação de VTs. Por sua vez, o outro componente desse serviço, o *End-to-End Negotiation Service* (E2ENS), é responsável pela negociação do *Service Level Agreement* (SLA) entre os domínios para a aceitação de um fluxo com determinada QoS.

Uma das principais vantagens desta abordagem é que ela promove o balanceamento de carga. Quando algumas reservas de recursos são bem sucedidas, elas podem alterar significativamente o estado da rede de um domínio. Nesse momento, o próprio domínio pode alterar sua VT mudando, por exemplo, a largura de banda disponível em determinado enlace virtual que pode ter diminuída com a aceitação de novas reservas (ou aumentada, com o cancelamento de outras). Sendo assim, o caminho que atravessa esse domínio com, por exemplo, melhor largura de banda mudou. Dessa forma, quando um outro VTS for reservar um caminho com largura de banda máxima, ele escolherá o novo caminho, evitando o escolhido por outros VTSs anteriormente. Outra vantagem do VTS é que um domínio pode definir VTs específicas (divulgando rotas ou características especiais) visando determinadas aplicações. Desta forma, essas aplicações terão informações mais relevantes para escolha da rota. Além disso, a forma como cada domínio implementa a

reserva de seus recursos é independente dos outros, podendo ser utilizadas tecnologias como DiffServ e MPLS.

Um funcionamento típico da arquitetura é mostrado na Figura 2.3. Inicialmente o nó cliente contacta o VTS para obter uma rota com determinada QoS até um destino específico (1). Em seguida, o VTS consulta a tabela local do BGP para obter as rotas disponíveis (2). Os VTSs dos domínios presentes nessas rotas são contactados pelo VTS local e suas VTs são enviadas (3). De posse de todas as VTs, o VTS local calcula o melhor caminho que satisfaz os requisitos de QoS definidos pelo cliente. Posteriormente, o VTS local contata o E2ENS local para que este negocie um SLA com os E2ENSs dos domínios da rota escolhida (4 e 5).

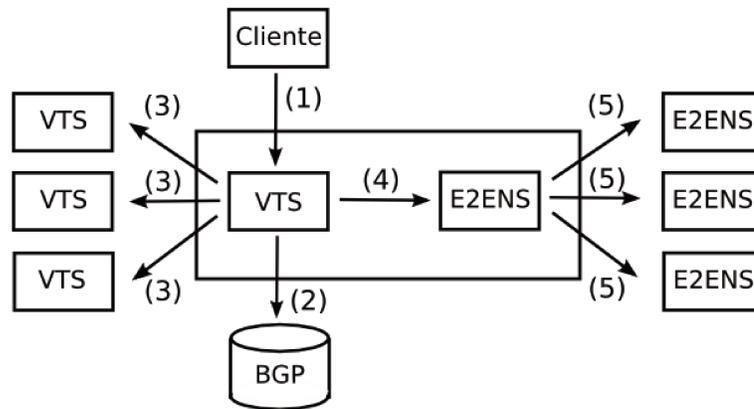


Figura 2.3: Funcionamento típico do serviço de roteamento com QoS.

Atualmente, a obtenção de VTs e a negociação de SLAs é feita no modelo estrela, ou seja, centralizadas, respectivamente, pelo VTS e E2ENS do domínio onde está o nó cliente. A principal vantagem do modelo estrela é que ele permite que a interação com cada domínio seja feita em paralelo, o que tende a tornar todo o processo de reservas mais rápido. Além disso, no caso da negociação, o modelo em estrela permite que os domínios interajam de forma mais refinada. Por exemplo, tomemos a reserva de recursos para um nó no Domínio A até um outro nó no Domínio C, passando pelo Domínio B. No modelo estrela, caso o Domínio A não fique satisfeito, por exemplo, com os preços para a reserva oferecidos pelo Domínio C, o Domínio A pode fazer uma contra-proposta e obter uma nova posição do Domínio C antes de tomar uma decisão por aceitar ou não aqueles valores. Caso fosse utilizado o modelo em cascata, o Domínio B seria o responsável por reservar os recursos em nome do Domínio A. Se, novamente, os preços oferecidos pelo Domínio C não estivessem dentro dos limites estipulados pelo Domínio A, o Domínio B não teria como fazer uma contra-proposta ao Domínio C e, simplesmente, abortaria a reserva. Dessa forma, a liberdade provida pelo modelo em estrela coloca-se como promissora para lidar

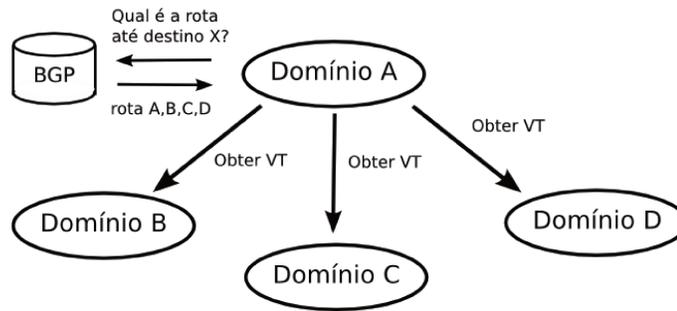


Figura 2.4: Obtenção de VTs no modelo *pull*.

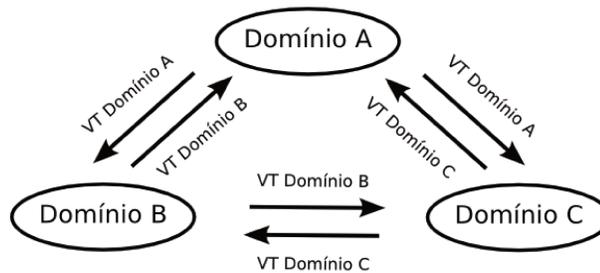


Figura 2.5: Divulgação de VTs no modelo *push*. Todos os domínios recebem todas as VTs.

com a heterogeneidade dos domínios e, por conseguinte, de suas políticas, bem como com a evolução de ambas.

Apesar do nó cliente poder escolher a rota para seu tráfego, pode ser que nenhuma das rotas disponibilizadas na tabela local do BGP satisfaça os requisitos de QoS almejados. Neste caso, o VTS contactará os VTSs dos domínios provedores do domínio local e requisitará as rotas BGP não divulgadas. De posse dessas rotas, o VTS local fará a análise da melhor rota e o E2ENS efetuará as negociações necessárias, como no procedimento descrito acima.

No funcionamento típico apresentado, a obtenção de VTs é feita no modelo *pull*, ou seja, de acordo com o surgimento das requisições do nó cliente (ver Figura 2.4). Um outro modelo apresentado em [20] é o *push*. Nesse modelo, cada domínio divulga suas VTs para todos os seus vizinhos (ver Figura 2.5), de acordo com relações comerciais previamente estabelecidas. Dada a quantidade de informação divulgada, este modelo é mais indicado para um grupo pequeno de domínios, como em um “condomínio de domínios”.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Os trabalhos relacionados com este projeto podem ser divididos em três grupos principais. Aqueles relacionados à NGN estudam, por exemplo, suporte à mobilidade, domínios autônomos e separação entre identificador e localizador. Aqueles relacionados à QoS inter-domínio analisam, dentre outros pontos, a divulgação de informação de QoS. Por fim, aqueles relacionados à virtualização investigam, por exemplo, arquiteturas de virtualização e compartilhamento de recursos.

3.1 Trabalhos Relacionados às NGNs

Como apresentado no Capítulo 1, o suporte à mobilidade tem-se tornado cada vez mais importante. Uma das mais conhecidas propostas, mencionada na Seção 2.2, é o *Mobile IP Protocol* (MIP) [35], que visa prover esse suporte através da utilização de dois endereços: *home-address* (endereço fixo) e *care-of-address* (endereço móvel). Dentre as limitações do MIP estão o desempenho e a restrição ao protocolo IP. Analisando-se o MIP, percebe-se que o *home-address* funciona como o identificador do nó, uma vez que é um endereço constante. Por sua vez, o *care-of-address* funciona como o localizador, indicando a posição atual do nó.

Uma outra abordagem para o suporte à mobilidade é através da separação explícita entre identificador e localizador, como em [32, 7]. Nesta abordagem, a conexão estabelecida na camada de transporte utiliza o identificador, e a transmissão na camada de rede utiliza o localizador. Desta forma, a conexão não precisa mudar se um dos nós mover-se, por exemplo, para outro domínio mudando seu endereço de rede (localizador) porque os identificadores permanecem os mesmos. O *Host Identity Protocol* (HIP) [32] traz o *Host Identity Namespace* como espaço de identificadores. Neste protocolo, os nomes são resolvidos em um *Host Identity*, e este último é associado ao endereço IP.

Por sua vez, a *Internet Indirection Infrastructure* (I3) [7] utiliza uma camada de in-

direção para oferecer serviços como mobilidade, *multicast* e *anycast*. Esta camada é uma rede sobreposta formada por um conjunto de servidores *i3* nos quais são guardados os *triggers*, associações entre identificadores e endereços IP. Desta forma, para enviar um pacote *i3* ou inserir um *trigger*, um nó deve contactar um servidor *i3*. Ao receber um pacote, o servidor buscará o *trigger* correspondente ao identificador de destino e encaminhará o pacote através da rede IP.

Para possibilitar melhores serviços aos usuários, é necessário dar suporte a uma maior autonomia e heterogeneidade dos domínios. A arquitetura TurfNet [14] provê essa autonomia aos domínios (*Turfs*) ao permitir a comunicação entre domínios sem necessitar endereçamento ou protocolo de rede globais. Por outro lado, é utilizado um espaço de nomes global. Nesta arquitetura, os *Turfs* são organizados em árvore e ligados a um núcleo comum. A comunicação e as adaptações de endereçamento e tecnologia entre os *Turfs* são realizadas pelos *gateways*.

3.2 Trabalhos Relacionados à QoS Inter-Domínios

A qualidade de serviço obtida no roteamento é muito importante pois tem grande impacto na qualidade dos serviços que as outras camadas (transporte e aplicação) poderão oferecer. Nessa linha, o projeto MESCAL [21] tenta prover QoS fim-a-fim através da combinação das classes de QoS de um domínio com as classes de seus BGP *peers*. Essa combinação é feita através de *Service Level Specifications* (SLSs) e resulta em um QoS fim-a-fim. Entretanto, uma das limitações do MESCAL é o uso do *QoS-enhanced BGP* (q-BGP) para engenharia de tráfego entre domínios, pois o processo de seleção de rotas precisa ser alterado para novos atributos de QoS. Isto seria muito custoso por necessitar atualizar todos os roteadores de borda na Internet.

Em [12], o BGP é estendido através do atributo QOS_NLRI [6] na mensagem BGP UPDATE, para divulgar largura de banda e atraso de rotas através de métricas estatísticas. Os autores argumentam que essas métricas diminuirão o *overhead* das mensagens do roteamento em relação às métricas determinísticas, tornando o roteamento e a divulgação das informações de QoS escaláveis.

O *Virtual Multi-Homing* (VMH) [24] visa prover roteamento na fonte (*source-based path selection*) e melhorar o roteamento entre domínios através da criação de uma rede *overlay* entre os ASes: *Multi-Homing Overlay Network*. Para montar a rede *overlay*, cada AS disponibiliza um ou mais *Multi-Homing Servers* (MHS), os quais estabelecem ligação e uma sessão virtual de BGP *peering* com MHSs de outros domínios. A sessão virtual de BGP *peering* visa manter atualizados os estados dos enlaces da rede *overlay*. A melhora da qualidade da comunicação fim-a-fim deve-se à possibilidade de escolha do caminho de envio de pacotes: o *default* (escolhido pelo BGP) ou através da rede *overlay*.

O NSIS (*Next Steps In Signaling*) [8] é um conjunto de protocolos de sinalização que contém, dentre outros, o QoS-NSLP (QoS - NSIS *Signaling Layer Protocol*) que é responsável pela reserva de recursos. Essa reserva é realizada em cascata, ou seja, as mensagens de requisição de recursos não são centralizadas pelo nó que iniciou a reserva, além disso, uma reserva pode ser iniciada tanto pelo nó que enviará o tráfego quanto pelo nó destino. Uma outra vantagem do QoS-NSLP é que ele pode ser utilizado com diferentes modelos de QoS pois as informações específicas a cada modelo são encapsuladas em um objeto QSPEC.

O Q3M [18] (*QoS Architecture for Multi-user Mobile Multimedia*) é uma arquitetura que visa controlar sessões multi-usuários (como em um *multicast*) em domínios heterogêneos garantindo QoS, conectividade e *seamless handover* em redes 4G. Esta arquitetura possui três módulos: MUSC (*Multi-User Session Control*), MIRA (*Multi-service Resource Allocation*) e SEMUD (*Seamless Mobility of Users for Media Distribution Services*, anteriormente chamado de CASM (*Cache-based Seamless Mobility*)). O MUSC [22] gerencia o acesso de usuários às sessões multi-usuários, bem como a mobilidade dessas sessões, além de prover mapeamento e adaptação de QoS para lidar com a heterogeneidade de recursos disponíveis entre os domínios. Para diminuir o impacto do *handover* sobre a QoS sentida pelo usuário, o MUSC configura as sessões previamente nos possíveis destinos de um nó para que os pacotes perdidos durante o *handover* possam ser recuperados pelo usuário ao chegar ao novo destino. O SEMUD [23], por sua vez, gerencia o processo de *handover* combinando predição de mobilidade e mecanismos de *buffer* e *cache*. Durante o *handover*, a aplicação no dispositivo móvel irá continuar lendo as informações do *buffer* e obterá os possíveis pacotes perdidos através do *cache* no domínio destino, o qual inicia o armazenamento de pacotes da sessão corrente com a atuação do MUSC, antes mesmo do *handover*. Como a predição de mobilidade, baseando-se na direção de movimentação do nó, velocidade, posição atual e registros históricos, resulta em uma lista de possíveis destinos, após o *handover* do nó, as sessões e *caches* iniciadas nos domínios diferentes ao destino que o nó escolheu são descartadas. Por fim, o MIRA [9] garante o nível de qualidade desejado em cada fluxo em uma sessão multi-usuário através do ajuste dos recursos associados às classes de serviço em cada domínio, além de prover a construção de árvores de *multicast* sensíveis a QoS. A comunicação entre módulos MIRA em diferentes domínios é feita através do protocolo MIRA-P, o qual estende o QoS-NSLP ao lidar com, por exemplo, informações sobre classes de serviço e *multicast*.

3.3 Trabalhos Relacionados à Virtualização

O Cabo (*Concurrent Architectures are Better than One*) [16] é uma plataforma que separa os provedores de infraestrutura dos provedores de serviços e permite que um provedor de

serviço monte uma rede virtual englobando recursos de vários provedores de infraestrutura. Conseqüentemente, este provedor de serviços terá controle sobre sua rede virtual, podendo aplicar políticas e protocolos mais adequados aos serviços que pretende oferecer, o que resultará em uma melhor QoS fim-a-fim.

O Cabernet (*Connectivity Architecture for Better Network Services*) [25] é uma evolução do Cabo e coloca uma nova camada entre o provedor de infraestrutura e o provedor de serviços: o provedor de conectividade. Esse agente tem como função simplificar o acesso dos provedores de serviços às redes virtuais ao passo que ele montará a rede virtual com recursos de vários servidores de infraestrutura, podendo customizá-la a determinado tipo de serviço. Dessa forma, o provedor de serviços poderá se concentrar na gerência de seus serviços e precisará relacionar-se somente com um provedor de conectividade, o que espera-se ser mais simples do que relacionar-se com vários provedores de infraestrutura.

Em uma tentativa de melhorar a alocação de recursos para múltiplas redes virtuais compartilhando uma mesma infraestrutura, a arquitetura DaVinci [26] utiliza uma alocação de recursos adaptativa baseada em teoria de otimização. Na arquitetura DaVinci, as cotas de largura de banda são periodicamente redistribuídas entre as redes virtuais de acordo com informações locais dos enlaces. Além disso, cada rede virtual executa um protocolo distribuído para maximizar sua performance (por exemplo, minimizando o atraso ou aumentando a vazão). Para os autores, a alocação de recursos adaptativa é estável e maximiza a utilização de recursos.

Capítulo 4

Uma Nova Abordagem para Reserva de Recursos no Gerenciamento de QoS entre Domínios em Redes de Próxima Geração

Neste capítulo, será apresentada nossa proposta para reutilização de reservas de recursos no gerenciamento de QoS entre domínios em NGNs. Como ela levou em consideração a abordagem atual utilizada no projeto AN para divulgação de informação de QoS, este capítulo inicia-se com a apresentação dessa abordagem, seguida pelo detalhamento da nossa proposta, seus desafios e vantagens. Por fim, serão discutidos uma estratégia de implementação através da criação do NGNVTS, seus módulos e funcionamento em um cenário de uso.

4.1 Abordagem do Projeto AN para Divulgação de Informação de QoS entre Domínios

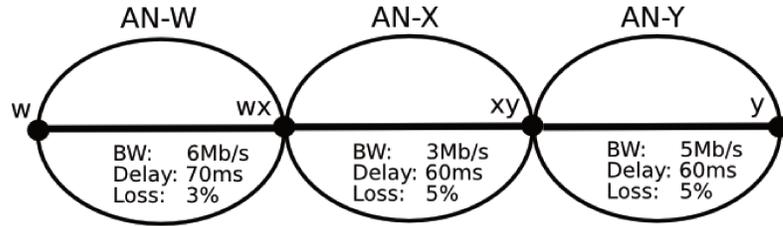
O estabelecimento de QoS inter-domínios é uma questão difícil nas redes atuais, e torna-se ainda mais difícil quando os domínios possuem diferentes tecnologias e são móveis. No projeto AN, a estratégia de QoS inter-domínios separa o gerenciamento de QoS de sua implementação (*enforcement*). Cada domínio implementa seu QoS independentemente (por exemplo, com tecnologias diferentes), mas o gerenciamento de QoS é compartilhado/acordado entre os domínios. De modo a ter uma visão do QoS de uma região da rede, um domínio necessita de informações sobre os recursos da rede de outros domínios. Dessa forma, no projeto AN, cada domínio divulga informações sobre os recursos de sua

rede através de um SLS (*Service Level Specification*), o qual contém informações como *jitter* e largura de banda de determinados enlaces e caminhos.

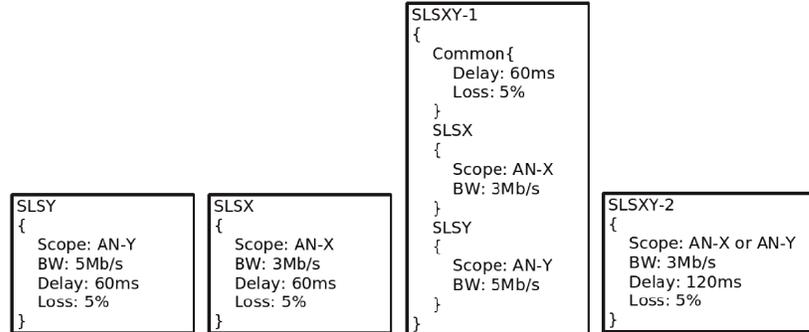
De modo a estabelecer a QoS de um caminho de comunicação que atravessa alguns domínios, um domínio necessitará de mais SLSs do que aqueles de seus vizinhos. Então, a primeira abordagem para tornar os SLSs de domínios distantes disponíveis foi a inundação (*flooding*) [15]. Nesta abordagem, cada domínio divulga sua SLS e encaminha as SLSs recebidas de um determinado vizinho para os outros. Esta abordagem fornece uma visão geral da rede para todos os domínios, mas possui um alto *overhead* de comunicação e problemas de escalabilidade. Conseqüentemente, para diminuir esse *overhead*, o projeto AN propôs a agregação de SLSs [2]. O processo de agregação visa unir SLSs de diferentes domínios/redes de modo a gerar um SLS resultante que carregue informações sobre esse conjunto de domínios e que seja menor do que a soma dos SLSs originais. Dessa forma, a divulgação do SLS resultante terá um *overhead* de comunicação menor do que a divulgação de todos os SLSs originais. A agregação de SLSs pode envolver a eliminação de redundância ou a modificação de informações como atraso e largura de banda.

De forma resumida, a agregação de SLSs prevê que um domínio agregará seu SLS com o SLS recebido de um determinado vizinho antes de encaminhar o SLS resultante para os outros vizinhos. Para facilitar a compreensão deste processo, a Figura 4.1 mostra um cenário de divulgação de SLSs com agregação, onde a disposição dos domínios é mostrada na Figura 4.1(a) e suas SLSs na Figura 4.1(b). Neste cenário, o domínio AN-W gostaria de obter uma visão do estado do caminho de comunicação até o nó *y*. Inicialmente, AN-Y divulga sua SLS (SLSY) para AN-X. Então, AN-X decide agregar sua SLS (SLSX) à recebida de AN-Y antes de divulgá-la. Assim sendo, AN-X gerou duas SLSs resultantes: uma com eliminação de redundância (SLSXY-1) e a outra com modificação de informação (SLSXY-2). Em SLSXY-1, as informações sobre atraso e perda são colocadas em uma seção identificada como comum a ambos domínios (AN-X e AN-Y), ao passo que a informação sobre largura de banda é separada por domínio. Já em SLSXY-2, a informação sobre a largura de banda dos domínios foi modificada de modo a ficar coerente com a realidade de ambos domínios, ou seja, foi minimizada a 3Mb/s (que é uma largura de banda que ambos domínios podem suprir). Por fim, AN-X escolhe a SLSXY-2, por ser menor do que SLSXY-1, e a divulga a AN-W, que passa a ter conhecimento sobre a condição da rede até o nó *y*.

A agregação de SLSs diminui o *overhead* de comunicação e possibilita uma visão constantemente atualizada de toda a rede para todos os domínios. Esta visão constantemente atualizada é muito útil quando um domínio quer rapidamente garantir a QoS de um determinado caminho de comunicação para um nó móvel que acabou de chegar. Isso pois o tempo da reserva de recursos, que atenderá a QoS almejada, dependerá somente da negociação dos recursos e sinalização, não da aquisição de SLSs.



(a) Disposição dos domínios



(b) SLSs dos Domínios AN-Y e AN-X

Figura 4.1: Divulgação de SLSs com agregação

Entretanto, esta abordagem possui algumas desvantagens:

- *Overhead*: O processo de agregação de SLSs gera um *overhead* de processamento.
- Alto custo para atualizações de SLS: Quando um domínio atualiza seu SLS devido a uma mudança no estado de sua rede, esse novo SLS será divulgado e essa atualização será cascateada por todos os domínios através da agregação de SLSs, resultando em um *overhead* de processamento e de comunicação.
- Perda de Informação: A agregação de SLSs envolve operações como a soma de atrasos e a minimização da largura de banda. Essas operações resultam em um SLS menos detalhado.
- Custos não proporcionais: Como a divulgação e agregação de SLSs são constantes, seus *overheads* de tráfego e processamento também são constantes. Sendo assim, se o número de reservas atendidas diminuir (por exemplo, em um horário de baixa utilização das redes), o custo relativo da divulgação e agregação de SLSs vai aumentar.

4.2 Uma Abordagem para Reutilização de Reservas no Gerenciamento de QoS entre Domínios

Levando em consideração a divulgação e agregação de SLSs, nossa proposta para reserva de recursos no gerenciamento de QoS entre domínios possui dois objetivos principais:

- baixo *overhead* de comunicação e de processamento.
- baixo tempo para reserva de recursos.

Visando atingir o primeiro objetivo, optou-se por utilizar o modelo sob demanda para aquisição de SLSs uma vez que, como visto na seção anterior, o modelo *push*, mesmo com agregação ou compressão de informação, possui um *overhead* grande. Dessa forma, somente quando um domínio tem uma requisição de um cliente a ser atendida ele pedirá os SLSs dos domínios atravessados pelo caminho de comunicação requisitado. Consequentemente, o número de SLSs divulgados diminuirá, não sendo necessária a agregação dos mesmos. Tem-se, assim, uma diminuição do *overhead* de comunicação (divulgação de SLSs) e de processamento (agregação de SLSs).

Para o segundo objetivo, embora espere-se que o tempo de reserva de recursos seja maior com o modelo sob demanda, por causa do tempo de aquisição de SLSs (ocorrida somente depois de feito o pedido de reserva), tentou-se diminuir o tempo de negociação e avaliação da admissão de tráfego. Essas etapas da reserva de recursos consomem muito tempo, uma vez que geralmente necessitam analisar políticas e contratos cada vez mais complexos. Consequentemente, simplificando-se essas etapas, espera-se obter uma considerável redução no tempo geral do processo de reserva de recursos.

Atualmente, devido à ubiquidade dos dispositivos móveis, o movimento de nós e redes tende a se tornar mais frequente, especialmente quando devidamente suportados pelas arquiteturas de redes, que espera-se ser o caso das redes NGNs. Geralmente, os nós movem-se de um domínio para outro que esteja próximo, principalmente porque o desejo de estar sempre conectado aumenta a probabilidade de um nó conectar-se a sucessivas redes vizinhas ao mover-se de um lugar a outro. Por exemplo, quando uma pessoa vai de casa para o trabalho enquanto assiste um filme em seu PDA, o PDA mover-se-á, como mostrado na Figura X, da *home network* para o WiMax da cidade (1), então, para a rede do metrô (2), novamente para o WiMax da cidade (3), e, finalmente, para a *office network* (4). Esses “pulos” são relativamente pequenos se comparados com o caminho de comunicação entre o PDA e o servidor de vídeo, que pode estar em outra cidade ou país.

Consequentemente, prover QoS para um ambiente tão dinâmico deve levar em consideração que, apesar da frequente movimentação de nós/redes, a comunicação entre dois nós terá seu caminho mudado gradualmente. Então, quando um caminho de comunicação

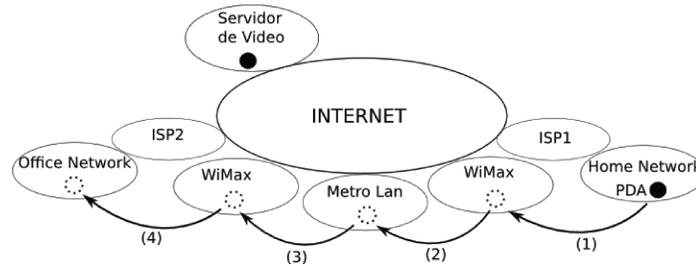


Figura 4.2: Exemplo de mobilidade durante sessão de vídeo *online*.

é reservado para satisfazer uma QoS requisitada, é muito provável que, depois de um dos nós finais mover-se (ou até mesmo uma rede inteira), a maioria das reservas de enlaces desse caminho seja útil para a reserva do novo caminho de comunicação e restabelecimento da QoS requerida.

Dessa forma, a nova abordagem de gerenciamento de QoS objetiva simplificar os processos de negociação e de admissão de tráfego através da utilização das reservas de enlaces de um caminho de comunicação entre dois nós para efetuar a reserva de recursos do novo caminho de comunicação entre esses dois nós depois que o primeiro caminho foi quebrado pela movimentação de um nó ou uma rede [17]. Ao fazer isso, somente os enlaces diferentes do novo caminho de comunicação (que não estavam presentes no primeiro caminho) necessitam ser negociados e avaliados segundo as políticas de admissão de tráfego. Espera-se que este processo seja mais rápido do que negociar e avaliar todos os enlaces.

Embora a rapidez do restabelecimento da QoS seja muito importante para os usuários móveis, pode haver cenários onde uma outra característica (como maior largura de banda ou menor atraso) seja mais interessante à aplicação cliente. Nesses casos, se um dos novos caminhos de comunicação for melhor (por exemplo, possuir uma largura de banda maior) do que o caminho com maior número de arestas em comum com o caminho quebrado, o serviço de QoS pode optar pelo primeiro. Entretanto, se a aplicação cliente prefere que o restabelecimento do QoS acordado seja o mais rápido possível, o serviço de QoS pode escolher o segundo caminho.

Infelizmente, uma das desvantagens desta abordagem é a necessidade de armazenar informações sobre cada reserva de recurso ativa para que possam ser reutilizadas por suas respectivas aplicações clientes se um novo caminho de comunicação tornar-se necessário. Entretanto, as vantagens são:

- Baixo *overhead*: Como a agregação de SLS não é necessária, o *overhead* de processamento é menor.
- Não há custos adicionais para atualizações de SLSs: uma atualização de SLS não

necessita ser comunicada a outros domínios. O SLS atualizado somente será transferido para atender a uma requisição de reserva de recursos.

- Não há perda de informações: Os SLSs não precisam ser agregados quando divulgados, o que elimina a perda de informação recorrente do processo de agregação.
- Custos proporcionais: O *overhead* de comunicação na aquisição de SLSs é proporcional às reservas atendidas. Então, se o número de reservas diminuir, o *overhead* também diminui.
- Restabelecimento de QoS mais rápido: Quando um novo caminho de comunicação precisa ser reservado, somente os recursos/arestas diferentes entre o caminho quebrado e o novo caminho serão negociados e avaliados.

A próxima subseção apresenta a implementação desta abordagem. Inicialmente, as principais razões da escolha do VTS como base da implementação serão apresentadas. Em seguida, alguns desafios e suas possíveis soluções serão listados. Finalmente, um cenário de reserva de recursos é descrito mostrando o funcionamento do NGNVTS.

4.3 Arquitetura do NGNVTS

Para a implementação da nova abordagem de gerenciamento de QoS, decidiu-se adaptar o VTS [20] às Redes de Próxima Geração criando-se um novo serviço denominado *Next Generation Network Virtual Topology Service* (NGNVTS). O VTS foi escolhido porque ele separa o gerenciamento da QoS da implementação (*enforcement*) da QoS e já oferece suporte ao modo sob demanda de divulgação de SLSs/VTs. Além do mais, a VT é uma abstração do estado de QoS de um domínio que é similar a uma SLS, como mostrado na Figura 4.3. Nessa figura, são exibidas a topologia, uma SLS e uma VT do domínio AN-X. A topologia mostra 3 enlaces virtuais com suas respectivas características: largura de banda, atraso e perda de pacote. Pela figura, nota-se que a principal diferença entre a VT e a SLS é a granularidade. Enquanto a SLS dá uma visão geral do domínio, apresentando os atributos que podem ser atendidos nos menores caminhos que atravessam o domínio (por isso a largura de banda foi minimizada e o atraso e a perda de pacotes maximizados), a VT provê uma visão mais detalhada, especificando as características de cada enlace virtual. Como a única diferença entre a SLS e a VT é a granularidade, e a VT é mais detalhada do que a SLS, a VT torna-se uma boa abstração para ser utilizada na divulgação de informações de QoS em Redes Ambientadas, uma vez que também permite que, quando desejado, um domínio gere uma visão menos detalhada de sua topologia através da fusão de alguns enlaces virtuais.

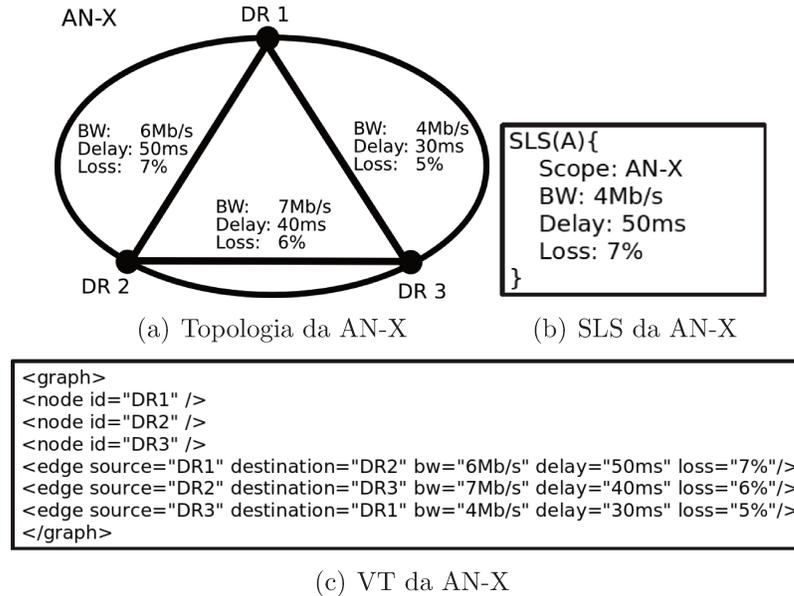


Figura 4.3: Semelhanças entre uma SLS e uma VT.

O uso do NGNVTS em Redes Ambientas precisa lidar com dois problemas: a ausência da tabela BGP e a necessidade de armazenar informação sobre as reservas ativas. Quando o VTS roda sobre uma rede IP convencional, a tabela BGP é usada para obter os domínios em uma determinada rota até um destino escolhido pela aplicação cliente, de modo que os VTSs desses domínios possam ser consultados e suas VTs obtidas. Nas Redes Ambientas, o ACS é a entidade responsável por controlar todo o domínio e fornecer diversas informações e serviços através de suas FEs. Então, é esperado que ele também forneça informações de roteamento como quais domínios estão presentes em uma determinada rota. Logo, o NGNVTS consulta um ACS, implementado neste trabalho como um serviço web (que é a tecnologia indicada pelo projeto Redes Ambientas como uma possível solução para a implementação das FEs [3]) em substituição às tabelas BGP. Para o segundo desafio, adaptou-se o E2ENS e o VTMS para armazenarem uma tupla (*reservation id*, *subpath*) para cada reserva bem sucedida (ou seja, aceita pelo E2ENS de um domínio). Um *subpath* é a parte de um caminho de comunicação englobada por um determinado domínio. Conseqüentemente, ambos serviços podem atender a requisições sobre uma reserva específica possibilitando seu reuso.

De modo a facilitar a compreensão e dirimir a ambigüidade entre o nome do antigo serviço (VTS) e o nome dos módulos, decidimos renomear também o antigo módulo VTS. Dessa forma, o NGNVTS é composto pelos módulos *Virtual Topology Management Service* (VTMS) e *End-to-End Negotiation Service* (E2ENS), os quais possuem as seguintes

funcionalidades:

- VTMS:
 - consultar um serviço de catálogo para obter os pontos de acesso (*service locations*) de outros VTMSs.
 - requisitar e divulgar VTs.
 - consultar o ACS para descobrir quais domínios estão na rota até um determinado destino.
 - armazenar tuplas (*reservation id, subpath*).
 - remover tuplas (*reservation id, subpath*).
- E2ENS:
 - negociar reservas de recursos requisitadas pelo VTMS.
 - pedir ao ACS para analisar e aceitar requisições de reservas de recursos.
 - armazenar tuplas (*reservation id, subpath*).
 - remover tuplas (*reservation id, subpath*).
 - informar o VTMS sobre reservas bem-sucedidas, através do envio da tupla (*reservation id, subpath*), para permitir que o VTMS atualize sua VT.
 - notificar a interrupção de uma reserva ao VTMS que originou aquela reserva.

Para melhor representar o processo de avaliação de uma requisição de reserva de recurso, o ACS implementado possui três FEs: *Traffic Admission Control Functional Entity* (TAC-FE), *Network Status Functional Entity* (NS-FE) e *Policy Repository Functional Entity* (PR-FE). Quando o ACS recebe uma requisição de reserva de recursos do E2ENS, essa reserva é encaminhada ao TAC-FE. Esta entidade funcional analisa a requisição baseada nas políticas e no estado atual da rede obtidos da PR-FE e NS-FE, respectivamente. Em seguida, a TAC-FE envia a resposta, aceitando ou negando a requisição, ao ACS, o qual a encaminha ao E2ENS.

A arquitetura do NGNVTS e sua interação com a Rede Ambiente estão ilustrados na Figura 4.4. Nessa figura, o ACS gerencia a infraestrutura e media o acesso do NGNVTS à ela. Ambos módulos do NGNVTS (VTMS e E2ENS) comunicam-se com o ACS para acessar funções como a descoberta dos domínios em uma rota e a notificação do movimento de uma rede ou nó.

Para facilitar a compreensão do processo de reserva, um cenário é ilustrado nas Figuras 4.5 e 4.6 e detalhado a seguir. A Figura 4.5 mostra a topologia dos domínios e a

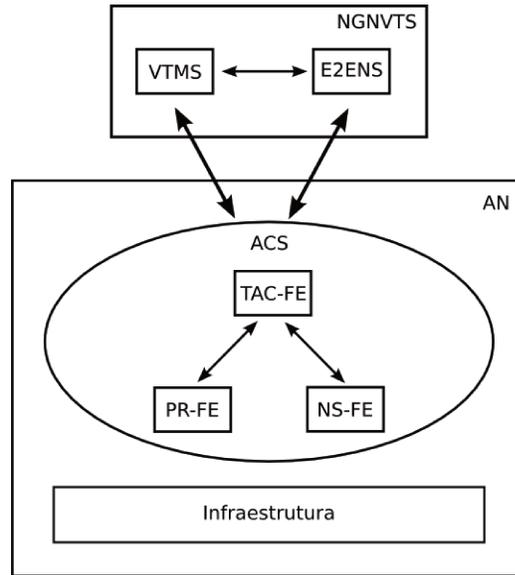


Figura 4.4: Interação entre o NGNVTS e a Rede Ambiente

Figura 4.6 apresenta o diagrama de sequência para esse processo. Este cenário possui 3 domínios: AN-A, AN-B e AN-C, e cada serviço ou DR de um domínio é indicado por sua abreviatura seguida pela letra do domínio (por exemplo, $VTMS_B$ indica o VTMS do domínio AN-B). A reserva inicia-se com a aplicação cliente, presente no nó *Client Node* (CN), pedindo ao $VTMS_A$ que reserve um caminho de comunicação até o nó *Destination Node* (DN) (1). Então, o VTMS consulta o ACS para descobrir quais domínios estão nas rotas até DN (2 e 3) e consulta o serviço de catálogo (*Catalog Service*) para obter os pontos de acesso dos VTMSs e E2ENSs desses domínios (4 e 5). Então, $VTMS_A$ adquire a VT de cada domínio (6 e 7), escolhe o melhor caminho (por exemplo, o mais barato) (8) e envia o *reservation id* e o caminho escolhido para $E2ENS_A$ (9). Para negociar o caminho escolhido, $E2ENS_A$ o quebra em *subpaths*. Então, $E2ENS_A$ envia o *subpath* local para ser analisado pelo ACS_A (10 e 11) e o outro *subpath*, juntamente com o *reservation id* e ponto de acesso do $VTMS_A$, para o $E2ENS_B$ (12). Ao receber um *subpath* para ser reservado, $E2ENS_B$ o encaminha para a análise do ACS_B (13), o qual, caso todas as políticas de admissão de tráfego sejam satisfeitas, retorna um rótulo para ser utilizado na configuração dos roteadores de saída (14). Então, $E2ENS_B$ armazena a tupla (*reservation id*, *subpath*) e envia o rótulo para $E2ENS_A$ (15). Depois de receber os rótulos de todos os E2ENSs (nesse caso, somente o $E2ENS_B$), $E2ENS_A$ sabe que a negociação foi bem-sucedida e inicia a configuração dos roteadores de saída mandando o rótulo recebido para o ACS_A (16 e 17). Nessa mesma comunicação, $E2ENS_A$ pede ao ACS_A para ser notificado caso algum dos nós que compõem o *subpath* local mova-se. Em seguida, $E2ENS_A$ notifica

$E2ENS_B$ que a reserva foi bem-sucedida (18 e 21). Então, $E2ENS_B$ pede ao ACS_B para ser notificado caso algum dos nós que compõem o *subpath* local mova-se de forma a quebrar alguma aresta do *subpath* (19 e 20). Finalmente, $E2ENS_A$ envia uma resposta positiva ao $VTMS_A$ (22), o qual, por sua vez, retorna o *reservation id* à aplicação cliente (23).

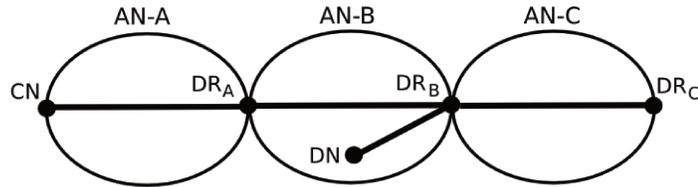


Figura 4.5: Topologia dos domínios no processo de reserva de recursos

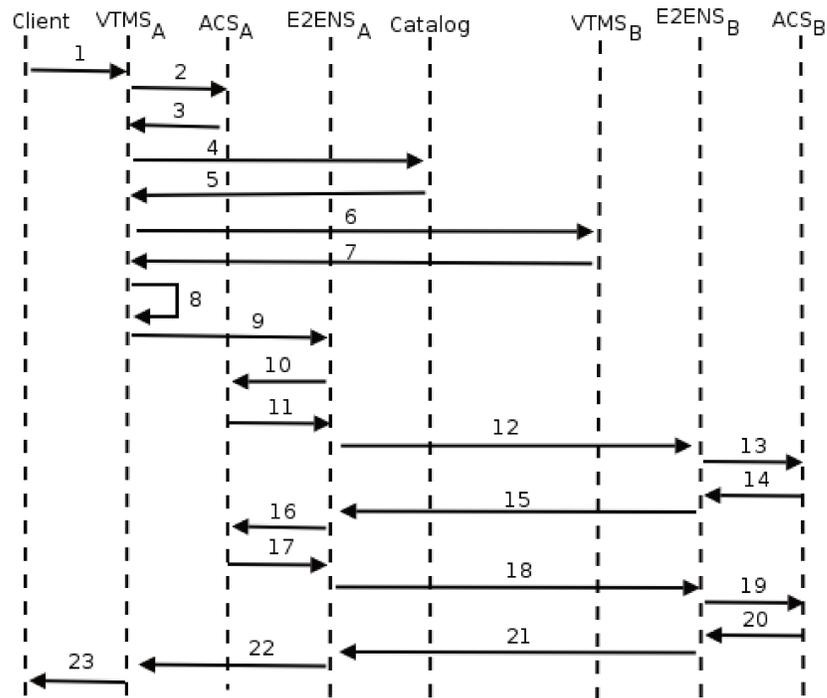


Figura 4.6: Processo de reserva de recursos no NGNVTS

Como mencionado anteriormente, uma das responsabilidades do E2ENS é notificar interrupções de reservas. A interrupção de uma reserva pode ocorrer, por exemplo, quando um nó em um *subpath* reservado move-se para um domínio diferente. Todas as interrupções de reservas são notificadas ao VTMS que originou aquela reserva para que ele possa iniciar uma nova reserva e restabelecer a QoS requisitada pela aplicação cliente (por isso é que

E2ENS_A envia o ponto de acesso do VTMS_A ao E2ENS_B no passo 12 do processo de reserva descrito acima). A única exceção a esse procedimento é quando o nó cliente (o nó no qual a aplicação cliente está sendo executada) move-se para um domínio diferente. Nesse caso, o nó cliente é responsável por iniciar a nova reserva enviando o *reservation id*, obtido como resposta bem-sucedida da primeira reserva, ao VTMS do seu novo domínio. De modo geral, para tentar reaproveitar as reservas anteriores de *subpaths*, o VTMS envia o *reservation id* da reserva interrompida quando requisita uma VT. Isso possibilita que o outro VTMS verifique esse *reservation id* entre as tuplas (*reservation id*, *subpath*) armazenadas e marque, na VT, as arestas do *subpath* associado a ele. Dessa forma, depois de obter todas as VTs, o VTMS será capaz de levar em consideração as arestas já reservadas quando for escolher o melhor caminho. A escolha de um caminho com mais arestas previamente reservadas aumenta a probabilidade de uma negociação mais rápida. Similarmente, o E2ENS também recebe o *reservation id* e o verifica entre as tuplas (*reservation id*, *subpath*) armazenadas quando da negociação de um *subpath*. Logo, se todas as arestas do novo *subpath* estão presentes no *subpath* previamente reservado, o E2ENS pode prontamente aceitar a requisição enviando o rótulo associado ao *subpath* reservado. Caso contrário, o E2ENS encaminhará a requisição à análise do ACS.

Para exemplificar o processo de estabelecimento uma nova reserva, um novo cenário é descrito a seguir. Neste cenário, baseado no anterior, o nó DN moveu-se para o domínio AN-C, como mostrado na Figura 4.7. Essa movimentação ocasionou a quebra da reserva realizada por VTMS_A (no cenário anterior), por isso E2ENS_B notificou VTMS_A, como mostrado no passo (1) do diagrama de sequência na Figura 4.8. Então, VTMS_A inicia a nova reserva obtendo os domínios na nova rota até DN (2 e 3) e os pontos de acesso de seus respectivos VTMSs e E2ENSs (4 e 5). Em seguida, VTMS_A requisita as VTs dos domínio AN-B e AN-C (6 e 9), que estão presentes na rota até DN. Com o objetivo de poder re-utilizar as reservas previamente feitas, VTMS_A envia nessas requisições o *reservation id* da reserva quebrada. Dessa forma, VTMS_B e VTMS_C checam esse *id* frente às tuplas (*reservation id*, *subpath*) armazenadas. Por causa da reserva inicial, a checagem realizada por VTMS_B resulta positiva e ele marca as arestas desse *subpath* na VT (7) que envia para VTMS_A (8). VTMS_C, por sua vez, não encontra *subpath* associado ao *reservation id* recebido, então, simplesmente, retorna sua VT para VTMS_A (10). De posse de todas VTs, VTMS_A escolhe o melhor caminho disponível (11), e o envia, juntamente com o *reservation id*, a E2ENS_A para ser reservado. Então, E2ENS_A quebra esse caminho em 3 *subpaths*: sPath_A, sPath_B e sPath_C, referentes aos domínios AN-A, AN-B e AN-C, respectivamente. Em seguida, E2ENS_A verifica (13) se sPath_A está incluso no *subpath* associado, em suas tuplas, ao *reservation id* recebido. Como a resposta é positiva, sPath_A não precisa ser avaliado pelo ACS_A. A mesma verificação é feita por E2ENS_B (15) e E2ENS_C (18) ao receberem sPath_B e sPath_C. Como a resposta é positiva para a verificação feita por

E2ENS_B, ele retorna o rótulo R_B, associado ao *reservation id*, para E2ENS_A. Por sua vez, a verificação feita por E2ENS_C resulta negativa e ele envia sPath_C para ser analisado por ACS_C (19), o qual aceita a reserva e retorna o rótulo R_C (20), que é encaminhado ao E2ENS_A (21). Com as respostas positivas de todos os E2ENSs, E2ENS_A sabe que a reserva foi bem sucedida e inicia a configuração dos roteadores enviando o rótulo R_B ao ACS_A e pedindo a ele para ser notificado caso algum dos nós presentes em sPath_A mova-se de modo a quebrar o enlace reservado (22 e 23). O mesmo ocorre com E2ENS_B ao receber o rótulo R_C (24, 25, 26 e 27). Por sua vez, E2ENS_C é notificado por E2ENS_A do sucesso da reserva (28 e 31) mas não recebe um rótulo pois não necessita configurar nenhum roteador de saída pois é o último domínio do caminho reservado. Semelhante aos outros E2ENSs, E2ENS_C também pediu ao ACS_C para ser notificado sobre a movimentação dos nós que compõem sPath_C. Por fim, E2ENS_A responde, positivamente, ao VTMS_A.

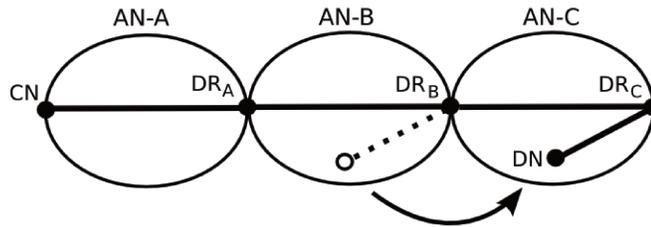


Figura 4.7: Topologia dos domínios no estabelecimento da nova reserva com reuso de reservas

Todos os outros casos como remoção ou atualização de uma reserva são simples e seguem, basicamente, os passos para reserva com pequenas mudanças. A remoção, por exemplo, inicia-se com a aplicação cliente solicitando ao VTMS local o cancelamento da reserva identificada por um determinado *reservation id*. Então, o VTMS encaminha essa requisição e o identificador ao E2ENS local, e repassa o *reservation id* em uma mensagem de cancelamento para os E2ENSs de todos os domínios no caminho de comunicação reservado.

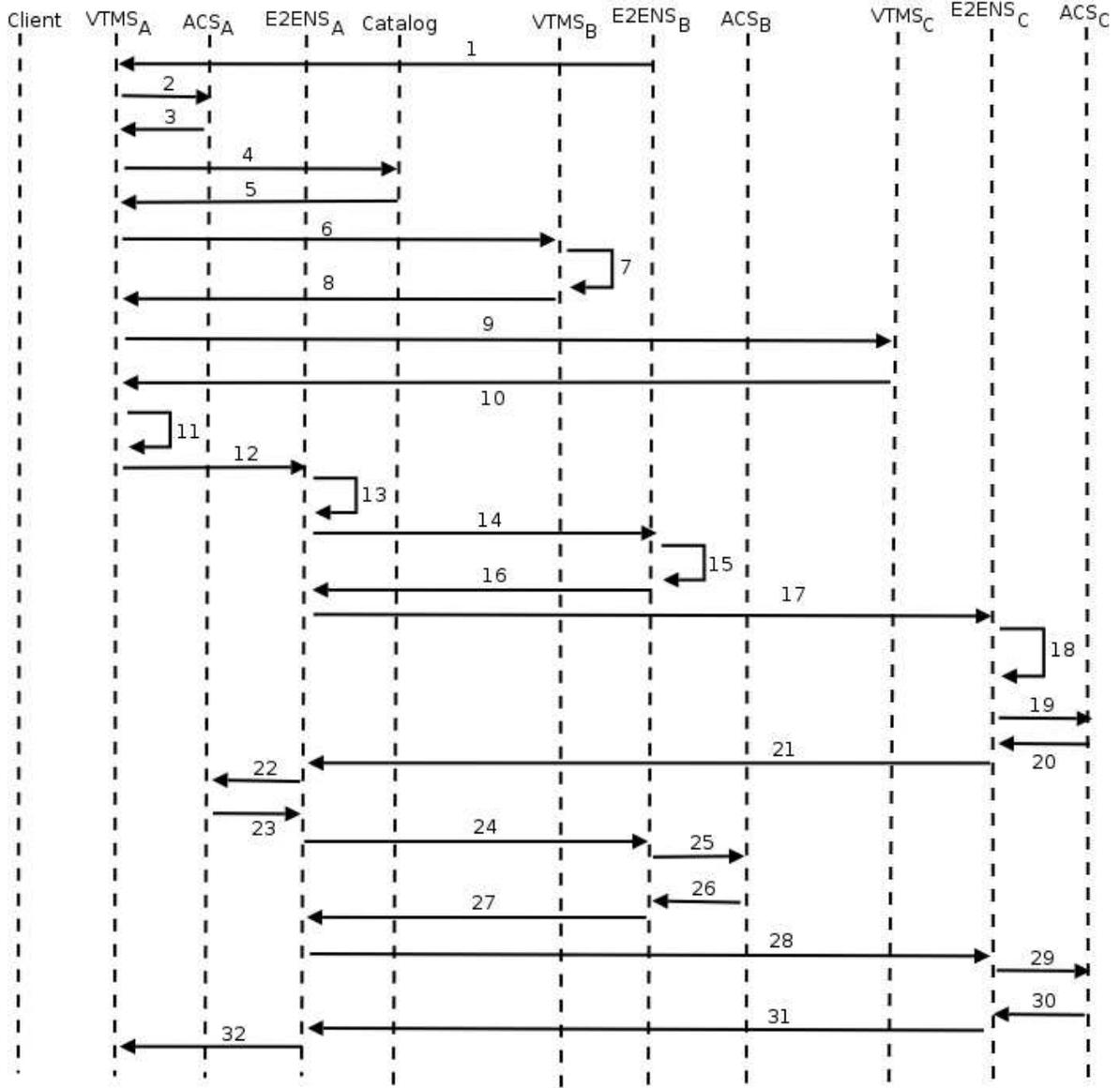


Figura 4.8: Processo de estabelecimento da nova reserva com reuso de reservas no NGNVTS

Capítulo 5

Implementação de um Protótipo do NGNVTS, Testes e Resultados

Este capítulo descreve os testes realizados com a implementação de um protótipo do NGNVTS. Os testes objetivaram mostrar a possibilidade do uso do NGNVTS em uma NGN (mais especificamente em uma Rede Ambiente) e estudar o impacto do reuso de reservas de recursos sobre o tempo de restabelecimento de QoS fim-a-fim.

5.1 Implementação

Nesta seção, pretendemos abordar questões diversas sobre a implementação de um protótipo do NGNVTS, bem como do ambiente sobre o qual foi testado. Dentre os diversos tópicos e desafios ligados à concretização da nossa proposta, alguns dos mais importantes são a tecnologia para disponibilização dos serviços, a linguagem de programação e bibliotecas utilizadas, e a rede sobre a qual os serviços executarão.

Todos os serviços desenvolvidos durante esse trabalho foram implementados como serviços web, mesmo aqueles que eram módulos de um serviço maior, como é o caso do VTMS e E2ENS que são módulos do NGNVTS e o caso do TAC-FE, PR-FE e NS-FE que são módulos do ACS. A escolha dessa tecnologia visou padronizar a comunicação entre os serviços e facilitar a acomodação de possíveis mudanças na disposição dos mesmos. Por exemplo, em uma rede muito grande, as entidades funcionais que compõem o ACS de um domínio podem estar distribuídas em alguns nós para evitar a sobrecarga de um nó específico. Nesse caso, como as FEs estão implementadas como serviços web, não seria necessária qualquer mudança para acomodar essa nova disposição.

A linguagem escolhida para implementação foi Python. Ela foi escolhida por ser de rápida prototipagem e por ter uma amplo leque de bibliotecas. A biblioteca utilizada para a criação dos serviços web foi a *SoapPy* v.0.11.6. A principal vantagem da *SoapPy*

e de Python, em relação a serviços web, é que elas facilitam a criação dos serviços ao possibilitar que os métodos de qualquer classe sejam disponibilizados para acesso remoto sem necessitar a criação de arquivos extras, como descrições em *Web Service Description Language*, ou o uso de servidores web externos como o Apache. A simplicidade de uso da biblioteca SoapPy está exemplificada no trecho de código das Figuras 5.1. Esse código mostra a instanciação do objeto *server*, o qual simboliza um servidor criado a partir da classe ACS, a definição da porta e *host* onde os serviços estarão disponíveis e quais métodos serão disponibilizados. Além da facilidade de disponibilização dos serviços, a *SoapPy* permite que todos os serviços de uma entidade remota (por exemplo, todos os métodos disponibilizados pelo ACS) sejam acessados através da simples instanciação de um objeto *SOAPProxy* bastando, para tal, fornecer o ponto de acesso do serviço. O trecho de código exibido na Figura 5.2, por exemplo, mostra o E2ENS instanciando um objeto que representará o ACS (o *acsServer*) e utilizando seu método *setMobilityTriggerInLastDomain*, o qual coloca um gatilho no ACS do último domínio de um caminho de comunicação para que o E2ENS seja notificado caso algum dos nós do caminho reservado mova-se.

```

self.server = SOAPpy.SOAPServer((self.hostname, self.port))
        :
        :
self.server.registerFunction(self.getDomainsInRoute)
self.server.registerFunction(self.getReservationPathLabel)
self.server.registerFunction(self.setUpStreamReservationLabel)
self.server.registerFunction(self.abortReservation)
self.server.registerFunction(self.setTriggerOnMobility)
self.server.registerFunction(self.notifyMobilityEvent)
self.server.registerFunction(self.updateDomainsInRoute)
self.server.serve_forever()

```

Figura 5.1: Trecho do código do ACS que define a disponibilização de seus métodos.

```

def setMobilityTriggerInLastDomain(self, path, remote):
    logger = Logger(self.logFileName)
    logger.start()
    acsServer = SOAPpy.SOAPProxy(self.acsServiceAccessPoint)
    for edge in path:
        acsServer.setTriggerOnMobility(edge[0], self.e2ensAP)
        acsServer.setTriggerOnMobility(edge[1], self.e2ensAP)
    logger.end(self.logName + " setMobilityTriggerInLastDomain " + path.__str__())

```

Figura 5.2: Trecho do código do E2ENS que utiliza um método disponibilizado pelo ACS.

Um outro ponto importante nos testes é a medição do tempo de execução de cada

serviço/método. Para facilitar essa medição e padronizar os registros guardados nos arquivos de *log*, criamos a classe *Logger* que utilizou o método *time.time()*, disponível na biblioteca padrão do Python, para a medição do tempo. Em cada método analisado, as primeiras chamadas eram a instanciação de um objeto *Logger* e o início da medição do tempo (*logger.start()*) e a última era o fim da medição (*logger.end()*), como mostrado na Figura 5.2. Inicialmente os arquivos de *log* estavam sendo armazenados no servidor de arquivos do laboratório, mas o tempo de acesso aos arquivos no servidor (em média, alguns milissegundos) prejudicava as medidas. Então, optou-se por armazenar os arquivos de *log* localmente em cada computador obtendo-se, assim, a diminuição do tempo de acesso para alguns centésimos de milissegundos.

Como mencionado na Seção 4.3, o ACS foi implementado para disponibilizar ao NGN-VTS algumas funcionalidades que atualmente não estão presentes nas NGNs mas que deverão estar futuramente. Sendo assim, para uniformizar a base sobre a qual os serviços seriam executados, colocou-se o ACS como base de todos os serviços, inclusive daqueles que não necessitam, atualmente, de suas funcionalidades implementadas como o serviço de catálogo e a aplicação cliente. De forma mais detalhada, a estrutura utilizada pelos serviços está ilustrada na Figura 5.3.

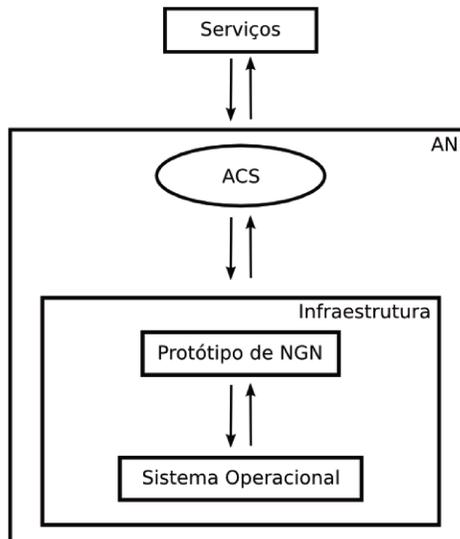


Figura 5.3: Estrutura de interação entre os serviços, o ACS e o protótipo de NGN.

Dentre os desafios enfrentados durante a implementação e teste dos serviços, estavam a configuração do protótipo e dos pontos de acesso 802.11. Apesar de muito bem implementado, o protótipo utilizado, por ser protótipo, requeria uma configuração manual em arquivos xml em cada nó que compusesse um domínio. Esse processo precisava ser feito de forma cautelosa porque um simples erro podia impossibilitar a comunicação de um nó

ou domínio. Os pontos de acesso, por sua vez, precisavam ser configurados (escolhendo uma faixa de operação) de modo a diminuir a interferência de outros pontos de acesso e roteadores sem-fio dos laboratórios vizinhos. Essa interferência era, por vezes, tão forte que impossibilitava a conexão do nó móvel com o ponto de acesso causando o travamento do módulo do sistema operacional responsável pelo gerenciamento da antena do nó móvel e necessitando que ele fosse reiniciado.

5.2 Testes

Os testes tiveram como objetivo estudar a integração entre o NGNVTS e uma NGN (mais especificamente uma Rede Ambiente) além de avaliar o desempenho da estratégia de reuso de reservas sobre o tempo de restabelecimento de QoS fim-a-fim. Dessa forma, os testes visaram a comparação entre a reserva de recursos utilizando a nova abordagem e utilizando a abordagem *default*, não concentrando-se, portanto, em questões como *handover*, implementação de QoS (*QoS enforcement*), e o tráfego a utilizar o caminho reservado.

Cada teste foi composto de três fases: reservas de recursos, evento de mobilidade e nova reserva de recursos. O evento de mobilidade é a movimentação de um nó ou domínio. A terceira fase é dividida em dois tipos: utilizando (a nova abordagem) ou não utilizando (abordagem *default*) informações sobre enlaces/arestas previamente reservadas para a efetuação da nova reserva. Os testes mediram o tempo gasto pelo NGNVTS para realizar a nova reserva de recursos pedida pela aplicação cliente. Como o objetivo dos testes não é o processo de *handover*, em cada teste, o evento de mobilidade somente ocorreu depois que a reserva de recurso estava concluída e a nova reserva somente ocorreu depois que o evento de mobilidade estava concluído.

Como mencionado na Seção 4.2, o desejo de permanecer sempre conectado faz com que a maioria dos nós mova-se entre redes de acesso vizinhas, ou seja, domínios próximos. Ao levarmos em conta que a maior parte do tráfego da Internet é *streaming* de vídeo http [30] e o modelo cliente-servidor é o mais comum para esse tipo de tráfego, espera-se que os eventos de mobilidade ocorram, basicamente, no lado do cliente. Por isso, em cada teste só ocorre um evento de mobilidade, no qual um nó ou domínio em uma extremidade do caminho de comunicação move-se para um outro domínio vizinho.

Como também abordado na Seção 4.2, o caminho de comunicação muda gradualmente quando a movimentação de um dos nós-fim ocorre entre redes de acesso consecutivas, que é o caso que esses testes visam abordar. Sendo assim, apesar do comprimento do caminho de comunicação reservado em cada cenário ter sido variado para analisar-se o impacto do número de enlaces/arestas reutilizados sobre o tempo do processo de estabelecimento da nova reserva, manteve-se constante como dois o número de arestas diferentes entre o primeiro caminho de comunicação e o novo (depois do evento de mobilidade).

De modo a obter-se uma análise mais ampla, quatro cenários foram desenvolvidos diferindo quanto ao ator do evento de mobilidade: nó cliente, nó destino, domínio do nó cliente, domínio do nó destino. Esses cenários possuem relevância especial para o projeto Redes Ambientes por contemplarem a mobilidade de nó (que representaria, por exemplo, o *notebook* de uma pessoa entrando e saindo da rede de um trem) e de domínio (que representaria, por exemplo, a rede de um trem entrando e saindo da rede de uma estação). Escolheu-se separar a mobilidade em cliente e destino para analisar-se a completude de informações dos novos serviços, ou seja, se os serviços conseguiriam, corretamente, detectar um evento de mobilidade que quebrou a reserva de um caminho e restabelecer uma nova reserva.

As topologias escolhidas para os testes basearam-se no fato de que a maior parte do tráfego da Internet atravessa até 5 *Autonomous Systems* (domínios) [33, 11, 19, 36]. Além disso, como os serviços implementados são relativos à gerência de um domínio, a avaliação desses serviços depende mais da interação com os serviços de outro domínio do que da complexidade topológica (quantidade de nós) de cada domínio. Dessa forma, cada domínio é representado, basicamente, por um nó (DR) que centraliza a gerência daquele domínio e hospedará seu serviço de QoS, sendo que dois dos domínios possuem um nó a mais, que representarão as extremidades do caminho de comunicação a ser reservado nos testes. Sendo assim, a infraestrutura para os testes é composta de 7 computadores, organizados em 5 domínios, ligados por uma LAN: CN, DN, DR₁, DR₂, DR₃, DR₄ e DR₅, com os dois últimos equipados com pontos de acesso sem-fio 802.11. CN é o nó cliente (*Client Node*), DN é o nó destino (*Destination Node*) e DR_X é o *DID Router* responsável pelo Domínio X. Similarmente, todas as entidades associadas com um domínio estão abreviadas como a abreviação da entidade seguida pelo número do domínio subscrito, por exemplo: E2ENS₃ é o E2ENS do Domínio 3. Enquanto cada DR hospeda o VTMS e o E2ENS de seu domínio, o *Catalog Service* é executado no DR₄, mesmo sendo acessado pelos VTMSs de todos os domínios, e a aplicação cliente é executada no CN.

Para cada cenário, foram executados 400 testes separados em dois grupos de 200 diferindo quanto à abordagem utilizada na terceira fase de cada teste: a nova abordagem ou a abordagem *default*. Os testes foram executados alternadamente, em relação a abordagem utilizada, para evitar que um dos grupos fosse afetado por flutuações da rede. As VTs de cada cenário são compostas pelas arestas presentes em cada domínio na figura que descreve aquele cenário. Em todas as VTs, o peso inicial de cada enlace é igual a 1. Como o algoritmo utilizado no VTMS escolhe o caminho de menor custo, quando um enlace é reservado, seu peso é acrescido de 1 para simbolizar a menor disponibilidade dos recursos que aquele enlace representa. A Figura 5.4 mostra, por exemplo, a VT do Domínio₅ utilizada no Cenário 3 dos testes. Esta VT está escrita em XML, que foi o formato utilizado em [20], e traz os NIDs dos nós em formato de endereço IPv4: “1.0.0.7”,

```

<graph>
<node id="1.0.0.7" weight="0"/>
<node id="1.0.0.16" weight="0"/>
<node id="1.0.0.19" weight="0"/>
<edge source="1.0.0.7" destination="1.0.0.19" weight="1"/>
<edge source="1.0.0.19" destination="1.0.0.16" weight="1"/>
</graph>

```

Figura 5.4: Exemplo de VT utilizada nos testes.

“1.0.0.19” e “1.0.0.16”, representando, respectivamente, DR_4 , DR_5 e DR_1 .

As subseções seguintes apresentam uma breve descrição de cada cenário acompanhada de uma figura mostrando a disposição dos nós e uma tabela mostrando os resultados dos testes para aquele cenário. Nas tabelas, as colunas mostram a abordagem utilizada (A), o comprimento do caminho de comunicação (C), as fases do processo de criação da nova reserva efetuado pelo NGNVTS: descoberta dos domínios na rota até o nó destino (Dom.), obtenção dos pontos de acesso dos VTMSs e E2ENSs desses domínios (P. A.), obtenção de suas VTs (VTs), escolha do caminho de comunicação (Escolha) e a negociação da nova reserva (Negociação), e, finalmente, o tempo total gasto (Total). As linhas separam a abordagem utilizada (**N** – nova abordagem, ou **D** – abordagem *default*) para cada subcaso, ou seja, comprimento do caminho de comunicação. Os valores apresentados nas tabelas são os tempos médios e o desvios padrão, em parênteses, para as 200 iterações de cada abordagem.

5.2.1 Cenário 1: Movimentação do nó cliente

Neste cenário, o nó cliente é o responsável pelo evento de mobilidade. Inicialmente, CN está no Domínio₄ e reserva um caminho de comunicação até DN, no Domínio₁. Então, CN move-se para o Domínio₅ (Fig 5.5). Ao chegar ao Domínio₅, CN pede ao VTMS₅ para iniciar a criação da nova reserva. Para variar o comprimento do caminho de comunicação, DN foi colocado em diferentes domínios. Logo, este cenário teve 3 subcasos diferindo quanto ao domínio onde DN está presente: Domínio₁, Domínio₂ e Domínio₃.

Os resultados deste cenário estão apresentados na Tabela 5.1 e mostram que o reuso de reservas prévias (a nova abordagem (N)) obteve tempos menores para todos os comprimentos de caminho (por exemplo, 213.16 ms versus 255.91 ms, para o caminho de 6 arestas). Esta economia de tempo deve-se à fase de negociação (por exemplo, 136.08 ms versus 187.10 ms, para o caminho com 6 arestas) e aumenta com o aumento do comprimento do caminho (por exemplo, 25.58 ms, 38.25 ms e 51.02 ms, na fase de negociação para caminhos de 4, 5 e 6 arestas respectivamente). Entretanto, a nova abordagem mostrou tempos maiores para a fase de obtenção de VTs (por exemplo, 63.29 ms versus 55.07 ms, para um caminho com 6 arestas).

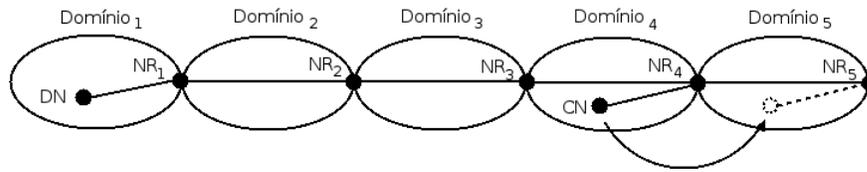


Figura 5.5: Disposição de nós para o Cenário 1.

Tabela 5.1: Resultados para o Cenário 1.

A	C	Dom. ms	P. A. ms	VTs ms	Escolha ms	Negociação ms	Total ms
D	6	4.59 (0.16)	7.55 (0.04)	55.07 (0.19)	0.95 (0.01)	187.10 (0.32)	255.91 (0.50)
N	6	4.67 (0.17)	7.53 (0.04)	63.29 (0.29)	0.94 (0.01)	136.08 (0.28)	213.16 (0.47)
D	5	4.36 (0.04)	6.80 (0.03)	43.66 (0.17)	0.73 (0.00)	148.39 (0.30)	204.46 (0.40)
N	5	4.31 (0.07)	6.81 (0.02)	50.48 (0.21)	0.72 (0.00)	110.14 (0.30)	172.99 (0.44)
D	4	4.06 (0.03)	6.17 (0.09)	33.10 (0.21)	0.54 (0.00)	109.85 (0.38)	154.18 (0.58)
N	4	4.19 (0.11)	6.09 (0.03)	38.85 (0.24)	0.53 (0.00)	84.27 (0.17)	134.40 (0.34)

5.2.2 Cenário 2: Movimentação do nó destino

Diferentemente do cenário anterior, neste cenário, o nó destino é o responsável pelo evento de mobilidade. Inicialmente, CN está no Domínio₁ e reserva um caminho de comunicação até DN, no Domínio₄. Então, DN move-se para o Domínio₅ (Fig 5.6). Em seguida, ACS₄ comunica esse evento ao E2ENS₄, o qual, por sua vez, o comunica ao VTMS₁, que inicia a criação da nova reserva. De modo a variar o comprimento do caminho de comunicação, o nó cliente foi colocado em diferentes domínios. Logo, este cenário teve 3 subcasos diferindo quanto ao domínio onde CN está presente: Domínio₁, Domínio₂ e Domínio₃.

Os resultados para este cenário são apresentados na Tabela 5.2. Similarmente ao cenário anterior, a nova abordagem obteve tempos menores para todos os comprimentos de caminho (por exemplo, 197.45 ms versus 250.12 ms, para o caminho com 6 arestas) e tempos maiores para a fase de obtenção de VTs (por exemplo, 56.22 ms versus 52.02 ms, para o caminho com 6 arestas).

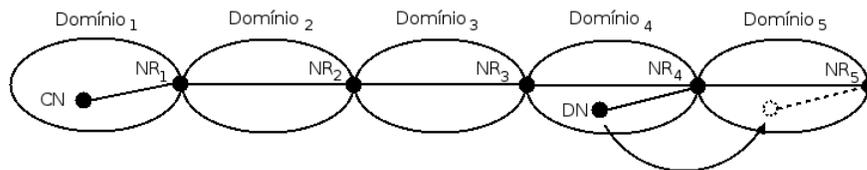


Figura 5.6: Disposição de nós para o Cenário 2.

Tabela 5.2: Resultados para o Cenário 2.

A	C	Dom. ms	P. A. ms	VTs ms	Escolha ms	Negociação ms	Total ms
D	6	3.64 (0.01)	7.13 (0.01)	52.02 (0.18)	0.93 (0.00)	185.83 (0.12)	250.12 (0.22)
N	6	3.64 (0.01)	7.12 (0.01)	56.22 (0.17)	0.91 (0.00)	128.96 (0.06)	197.45 (0.18)
D	5	3.50 (0.01)	6.45 (0.01)	45.73 (0.14)	0.90 (0.00)	145.38 (0.07)	202.47 (0.16)
N	5	3.54 (0.01)	6.62 (0.04)	48.55 (0.17)	0.88 (0.00)	101.42 (0.06)	161.54 (0.19)
D	4	3.39 (0.01)	5.68 (0.01)	35.07 (0.06)	0.68 (0.00)	108.59 (0.11)	153.85 (0.12)
N	4	3.38 (0.01)	5.70 (0.01)	36.68 (0.06)	0.68 (0.00)	76.47 (0.03)	123.36 (0.08)

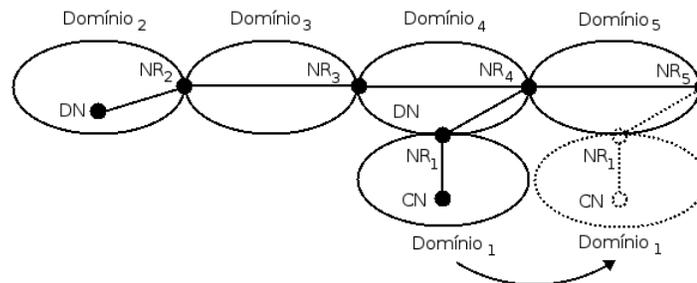


Figura 5.7: Disposição de nós para o Cenário 3.

5.2.3 Cenário 3: Movimentação do domínio do nó cliente

Diferentemente dos cenários 1 e 2, neste cenário, o domínio do nó cliente (Domínio₁) é o responsável pelo evento de mobilidade. Inicialmente, CN, no Domínio₁, reserva um caminho de comunicação até DN, no Domínio₂. Então, Domínio₁ move-se rompendo sua ligação com o Domínio₄ e estabelecendo uma nova com o Domínio₅ (Fig 5.7). Após o Domínio₁ completar sua ligação ao Domínio₅, VTMS₁ inicia a criação da nova reserva. Para variar o comprimento do caminho de comunicação, o nó destino foi colocado em diferentes domínios. Logo, este cenário teve 3 subcasos diferindo quanto ao domínio onde DN está presente: Domínio₂, Domínio₃ e Domínio₄.

Os resultados para este cenário estão presentes na Tabela 5.3 e mostram, similarmente aos cenários anteriores, que a nova abordagem obteve menores tempos para todos os comprimentos de caminho (por exemplo, 268.62 ms versus 314.46 ms, para o caminho de 6 arestas) e tempos maiores para a fase de obtenção de VTs (por exemplo, 77.24 ms versus 69.81 ms, para o caminho de 6 arestas).

5.2.4 Cenário 4: Movimentação do domínio do nó destino

Neste cenário, o nó destino está no Domínio₁, o qual é responsável pelo evento de mobilidade. Inicialmente, CN, no Domínio₂, reserva um caminho de comunicação até DN. Então, Domínio₁ move-se rompendo sua ligação com o Domínio₄ e estabelecendo uma

Tabela 5.3: Resultados para o Cenário 3.

A	C	Dom. ms	P. A. ms	VTs ms	Escolha ms	Negociação ms	Total ms
D	6	3.82 (0.01)	11.86 (0.17)	69.81 (0.86)	0.98 (0.01)	227.41 (1.15)	314.46 (1.39)
N	6	3.81 (0.01)	12.21 (0.30)	77.24 (0.89)	0.95 (0.01)	173.78 (0.97)	268.62 (1.43)
D	5	3.71 (0.03)	11.15 (0.21)	57.75 (0.55)	0.92 (0.00)	177.35 (1.15)	251.44 (1.29)
N	5	3.67 (0.01)	11.74 (0.60)	64.00 (0.61)	0.92 (0.00)	139.74 (1.66)	220.65 (1.82)
D	4	3.52 (0.01)	11.35 (0.61)	42.73 (0.16)	0.69 (0.00)	130.07 (1.23)	188.96 (1.38)
N	4	3.48 (0.03)	10.82 (0.45)	47.80 (0.60)	0.69 (0.01)	104.00 (1.30)	167.39 (1.74)

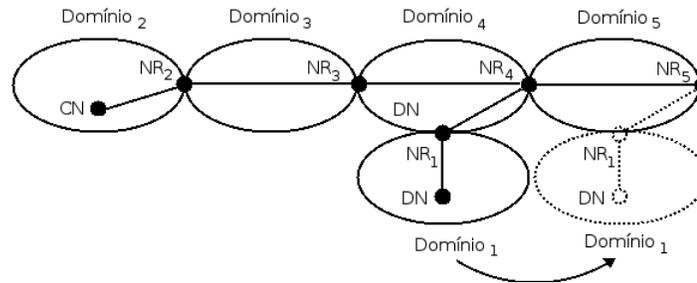


Figura 5.8: Disposição de nós para o Cenário 4.

nova com o Domínio₅ (Fig 5.8). Depois de completado o estabelecimento da nova ligação, ACS₄ e ACS₁ comunicam esse evento ao E2ENS₄ e ao E2ENS₁, respectivamente. Então, ambos E2ENSs notificam VTMS₁, o qual inicia a criação da nova reserva. Para variar o comprimento do caminho de comunicação, o nó cliente foi colocado em diferentes domínios. Logo, este cenário teve 3 subcasos diferindo quanto ao domínio onde CN está presente: Domínio₂, Domínio₃ e Domínio₄.

Os resultados deste cenário são apresentados na Tabela 5.4. Neste cenário, a nova abordagem também obteve melhores tempos para todos os comprimentos de caminho (por exemplo, 234.62 ms versus 277.14 ms, para o caminho de 6 arestas) e tempos maiores para a fase de obtenção de VTs (por exemplo, 71.44 ms versus 63.58 ms, para o caminho de 6 arestas).

Tabela 5.4: Resultados para o Cenário 4.

A	C	Dom. ms	P. A. ms	VTs ms	Escolha ms	Negociação ms	Total ms
D	6	4.16 (0.05)	7.99 (0.05)	63.58 (0.76)	1.34 (0.02)	199.51 (1.28)	277.14 (1.73)
N	6	4.38 (0.07)	8.22 (0.09)	71.44 (1.20)	1.29 (0.01)	148.69 (0.69)	234.62 (1.38)
D	5	3.61 (0.02)	6.59 (0.06)	53.38 (0.58)	0.91 (0.04)	163.63 (0.99)	228.68 (1.23)
N	5	3.59 (0.01)	6.47 (0.03)	60.50 (0.69)	0.86 (0.01)	127.19 (1.06)	199.14 (1.37)
D	4	3.40 (0.00)	4.70 (0.00)	41.11 (0.64)	0.64 (0.00)	123.12 (0.96)	173.38 (1.17)
N	4	3.40 (0.00)	4.70 (0.00)	42.28 (0.53)	0.65 (0.00)	96.71 (0.81)	148.16 (0.94)

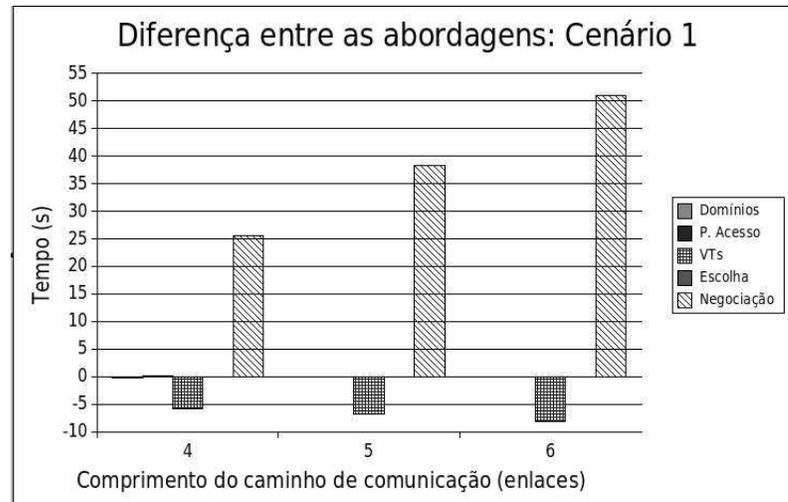


Figura 5.9: Diferença de tempo entre as abordagens no Cenário 1.

5.3 Análise dos Resultados

Analisando-se os resultados dos testes, percebe-se que, em todos os cenários, o reuso de reservas prévias diminui o tempo do processo de criação da nova reserva. As Figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 mostram a diferença de tempo entre a nova abordagem e a abordagem *default* em cada fase para cada cenário. Nos gráficos, são mostrados os valores do tempo da abordagem *default* subtraído do tempo da nova abordagem, sendo assim, valores positivos mostram que nossa abordagem foi mais rápida, e valores negativos mostram o oposto. Analisando-se os gráficos, percebe-se que, em todos os cenários, as abordagens apresentaram diferenças significativas somente em duas fases: a de obtenção de VTs e a de negociação. Na fase de obtenção de VTs, a abordagem *default* foi mais rápida. Já na fase de negociação, a nova abordagem apresentou uma grande economia de tempo da nova abordagem em relação à *default*. Esta fase começa quando o VTMS pede ao E2ENS para negociar um determinado caminho de comunicação e termina quando o VTMS recebe uma resposta positiva do E2ENS. Esta economia era esperada porque ao reutilizar-se enlaces das reservas anteriores, libera-se os E2ENSs responsáveis por aqueles enlaces da necessidade de re-submeter aqueles pedidos de reserva à análise do processo de admissão de tráfego. Conseqüentemente, quanto mais complexos forem as políticas e, por conseguinte, o processo de admissão de tráfego ou quanto maior for o número de enlaces reutilizados maior será a economia de tempo.

Dessa forma, como esperado, o aumento da vantagem da nova abordagem acompanhou o aumento do caminho de comunicação, como mostrado na Figura 5.13. Isso é devido ao fato de que, como mencionado anteriormente, a parte constante dos caminhos é composta por duas arestas, sendo assim, quanto maior o caminho de comunicação, maior é a relação

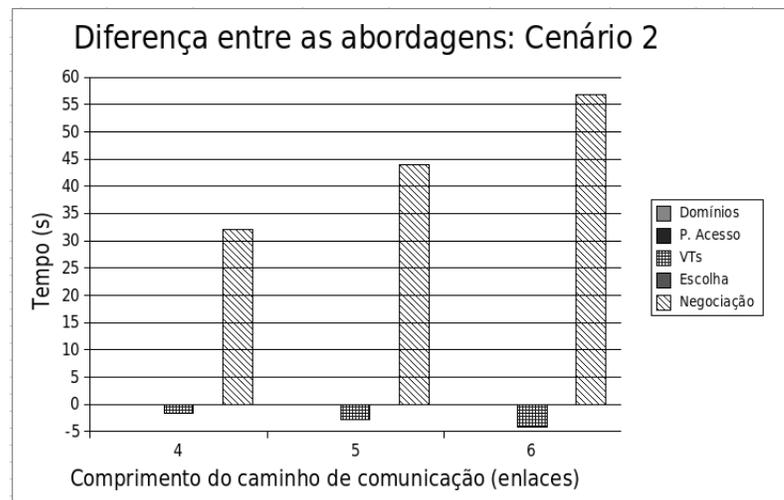


Figura 5.10: Diferença de tempo entre as abordagens no Cenário 2.

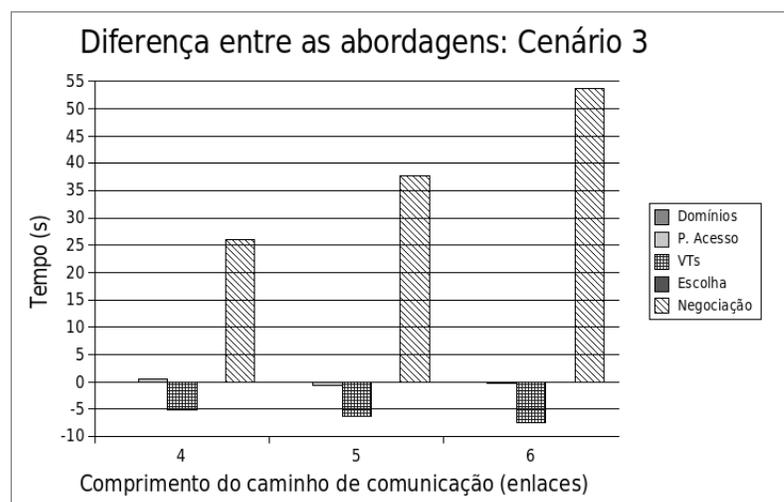


Figura 5.11: Diferença de tempo entre as abordagens no Cenário 3.

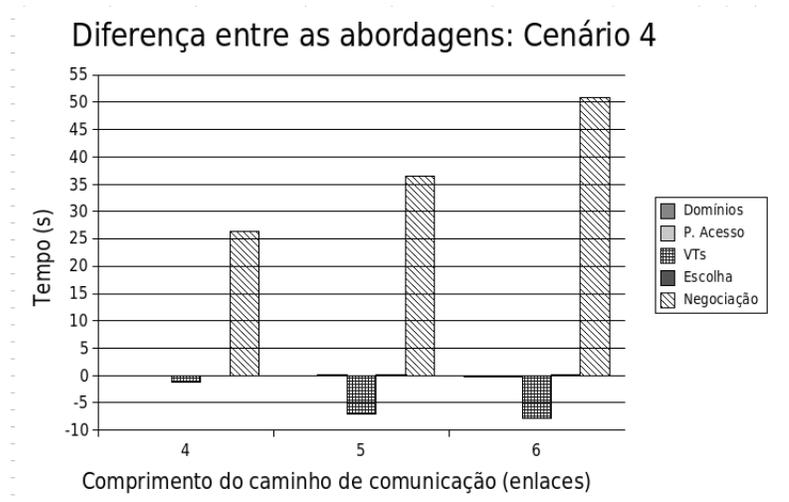


Figura 5.12: Diferença de tempo entre as abordagens no Cenário 4.

entre o número de arestas reutilizadas pela nova abordagem e o número total de arestas. Neste gráfico, são mostradas as diferenças de tempo do processo de reserva (tempo gasto pela abordagem *default* subtraído do gasto pela nova abordagem) para cada comprimento de caminho de comunicação (4, 5, ou 6) em cada cenário.

Por outro lado, como mostrado nas Figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12, a nova abordagem apresentou um tempo maior na fase de obtenção das VTs. Isso deve-se ao fato de que antes de responder a um pedido de obtenção de VT com um determinado *reservation id*, o VTMS tem que consultar se existe algum *subpath* associado a esse *reservation id* e, caso haja, marcar, na VT, as arestas deste *subpath*. Entretanto, em um cenário real, o tempo gasto para marcar uma VT será menos significativo, uma vez que todo o processo de reserva, especialmente a fase de negociação, consumirá mais tempo. Ademais, as políticas de admissão de tráfego mais complexas de um cenário real possibilitarão que a nova abordagem alcance economias de tempo ainda maiores quando reutilizando enlaces, como mencionado no parágrafo anterior, diminuindo ainda mais o impacto do tempo gasto para marcar as VTs.

De forma geral, os testes mostraram que é possível o uso do NGNVTS em Redes de Próxima Geração. Além disso, espera-se que a alta mobilidade característica das Redes Ambientais favoreça ainda mais os ganhos de tempo nas reservas de recursos com o NGNVTS. Como a movimentação de nós deve ser intensa e a maioria dos movimentos deve ser para domínios próximos, o tempo de reserva de recursos e sua economia tornam-se muito importantes para a dinâmica das Redes Ambientais. Ademais, a movimentação de nós para domínios próximos aumenta as chances de existirem enlaces comuns entre o antigo e o novo caminho de comunicação, o que aumenta as chances de reuso desses enlaces

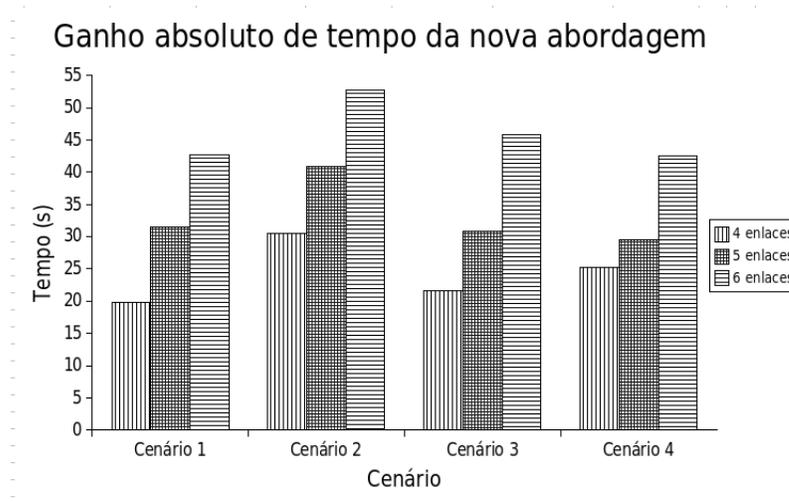


Figura 5.13: Ganho de tempo da nova abordagem.

consequentemente aumentando a probabilidade de economia de tempo com o NGNVTS.

Capítulo 6

Conclusão

A evolução tecnológica proporcionou o surgimento de diversos dispositivos capazes de conectarem-se à Internet. Para acomodar essa diversidade e otimizar o uso desses novos dispositivos, especialmente os móveis, tornaram-se necessárias novas arquiteturas de redes surgindo, então, as Redes de Próxima Geração ou *Next Generation Networks*. Com a crescente complexidade de aplicações, as NGNs enfrentam também o desafio de prover melhor qualidade de serviço sem comprometer o suporte à heterogeneidade e à mobilidade de seus nós e redes. Visando abordar esse desafio, este trabalho apresentou uma estratégia para o gerenciamento de QoS inter-domínios que almeja prover qualidade de serviço fim-a-fim, através da reserva de recursos, levando em consideração a alta mobilidade esperada nas NGNs.

A proposta apresentada nesse trabalho leva em consideração o desejo crescente por uma conexão constante com a Internet. Dessa forma, acredita-se que a maioria dos usuários tenta conectar-se consecutivamente a redes de acesso vizinhas durante seus trajetos. Esse comportamento traz uma grande implicação para os caminhos de comunicação utilizados pelos usuários durante sua movimentação: a mudança gradual. Como os usuários mudam de redes de acesso durante seu trajeto, é esperado que o caminho de comunicação utilizado com seus correspondentes (um servidor de vídeo, por exemplo) mude gradualmente, mais especificamente nos enlaces de acesso. Sendo assim, um caminho que pode conectar um usuário a um servidor em outra cidade (ou país), apesar de possuir vários enlaces, deverá alterar só alguns enlaces extremos durante a movimentação do usuário. Considerando esse comportamento, este trabalho apresenta uma estratégia de reutilização da reserva de recursos para estabelecimento de novas reservas após eventos de mobilidade. Dessa forma, através do armazenamento de informações sobre cada reserva de um usuário, o estabelecimento da QoS de um novo caminho de comunicação para o mesmo usuário pode utilizar as antigas reservas de recursos e dispensar (ou acelerar) a etapa de negociação e avaliação para admissão de tráfego.

Para poder avaliar essa proposta, decidiu-se adaptar o VTS, pois ele separa o gerenciamento da QoS da implementação da QoS podendo, assim, lidar melhor com a diversidade de tecnologias esperadas entre os domínios e nós nas NGNs, criando-se o *Next Generation Network Virtual Topology Service* (NGNVTS). Com o intuito de agregar mais conhecimento sobre uma área com poucas implementações, optou-se por testar o NGNVTS em uma NGN real. Para tal foi utilizado um protótipo que dá suporte à mobilidade de nó e de domínio e foi desenvolvido na FEEC - UNICAMP. Para representar o ambiente de gerência esperado futuramente das NGNs e possibilitar a integração do NGNVTS com o protótipo, foi implementado, como um serviço web, um *Ambient Control Space* com funções como notificação de mobilidade, a qual notifica um serviço caso um determinado nó mova, e descoberta dos domínios em determinada rota, a qual era configurada previamente com as informações necessárias para os testes a serem realizados.

No cenário geral dos testes, um nó cliente pede ao NGNVTS de seu domínio para que reserve recursos em um caminho até um nó destino. Em seguida, algum nó ou domínio move-se e dispara a criação de uma nova reserva para o novo caminho de comunicação. Os testes realizados visaram medir o tempo gasto pelo NGNVTS para efetuar a reserva desse novo caminho de comunicação ora utilizando reservas previamente realizadas (nossa abordagem) ora não utilizando-as (abordagem *default*). De forma mais específica, foram criados 4 cenários diferindo quanto ao autor da mobilidade (nó cliente, nó destino, domínio do nó cliente e domínio do nó destino) para testar os mecanismos de notificação de movimentação e acionamento de novas reservas. A infraestrutura para os testes foi composta por 7 computadores: CN, DN, DR1, DR2, DR3, DR4 e DR5, agrupados em 5 domínios, cada um representado e gerenciado pelo seu respectivo *Domain ID Router* (DR). Contemplando-se a maior probabilidade da movimentação de um nó/domínio ocorrer entre redes de acesso e a mudança gradual do caminho de comunicação, como mencionado acima, os eventos de mobilidade dos testes ocorreram nos extremos (nó ou domínio) do caminho de comunicação fazendo com que o novo caminho diferisse somente em duas arestas em relação ao caminho anterior (antes do evento de mobilidade). Por fim, em cada cenário, ora o nó cliente ora o nó destino foram reposicionados para alterar o comprimento do caminho de comunicação e permitir o estudo do impacto desse comprimento no tempo gasto pelo NGNVTS para a efetuação de uma nova reserva.

Analisando-se os tempos médios para as 200 iterações de cada teste, percebeu-se que a abordagem de reuso de reservas obteve tempo menor para todos os cenários em todos os comprimentos de caminho de comunicação (por exemplo, nos cenários 1, 2, 3 e 4 nossa abordagem obteve, respectivamente, uma economia de tempo de 42,75 ms, 52,67 ms, 45,84 ms e 42,52 ms em relação à abordagem *default* para o caminho de comprimento 6). Além disso, as economias de tempo em cada cenário aumentaram com o comprimento do caminho (por exemplo, no cenário 2, a nossa abordagem economizou 30,49 ms, 40,93

ms e 52,67 ms em relação à abordagem *default* para caminhos com comprimento 4, 5 e 6 respectivamente). Esses dois resultados eram esperados pois o reuso de reservas possibilita que alguns domínios dispensem a negociação e avaliação de admissão de tráfego tornando o processo de reserva de recursos mais rápido. Dessa forma, quanto maior o número de arestas reutilizadas maior será o tempo economizado em relação à abordagem *default*. Analisando-se com mais detalhes os tempos gastos pelo NGNVTS, percebemos que a etapa de obtenção de VTs gastou mais tempo com a nossa abordagem. Isso é devido à necessidade de um VTMS marcar na VT as arestas já reservadas para um dado usuário antes de enviá-la para possibilitar que o VTMS do domínio local do usuário possa levar em conta as arestas já reservadas na escolha do melhor caminho. Entretanto, o tempo gasto para marcar as VTs não comprometeu a economia de tempo da nossa abordagem. Além disso, acreditamos que no uso real, a complexidade das políticas a serem analisadas durante a negociação e avaliação de admissão de tráfego tornarão essas etapas bem mais demoradas o que diminuirá o impacto do tempo de marcação das VTs em relação ao tempo total do processo de criação de uma nova reserva.

Em suma, as principais contribuições desse trabalho são a proposta de uma estratégia de reutilização de reservas de recursos para acelerar o restabelecimento de novas reservas após eventos de mobilidade, sua implementação através da criação do NGNVTS, adaptado às NGNs, e o teste e análise dessa estratégia e de sua implementação em diferentes cenários de mobilidade sobre um protótipo de NGN. Os testes mostraram que a estratégia de reutilização de reservas trouxe uma melhora ao processo de restabelecimento de QoS ao acelerar o processo de criação de uma nova reserva de recursos, e que é possível utilizar o NGNVTS em Redes de Próxima Geração. Acreditamos que a mobilidade será um dos fatores mais marcantes das NGNs e que elas poderão beneficiar-se da abordagem aqui apresentada.

Por fim, entre os trabalhos futuros, está o estudo de estratégias para agregação de reservas. Atualmente, as reservas são negociadas, sinalizadas e monitoradas individualmente, o que pode ser muito custoso para domínios reais com um grande número de nós. A agregação de reservas pode diminuir esse custo mas traz desafios como o balanceamento entre a complexidade do processo de agregação e a probabilidade de agregação de reservas, uma vez que a diversidade dos destinos com os quais os nós podem comunicar-se tende a dificultar a agregação das reservas requisitadas por eles. Um outro estudo importante é a utilização da virtualização e da separação entre gerenciamento de QoS e implementação de QoS, fornecida pelo NGNVTS, para o estabelecimento de classes de QoS comuns entre um conjunto de domínios. Caso os domínios consigam negociar e utilizar classes de QoS comuns sem comprometer suas autonomia e heterogeneidade, a negociação e a sinalização das reservas seriam grandemente simplificadas porque focariam em classes de QoS ao invés de reservas individuais.

Referências Bibliográficas

- [1] Ambient Networks Project. <http://www.ambient-networks.org/>, 2006.
- [2] Ambient Networks Project. D3-G.1 - Design of Composition Framework, Technical Report, Novembro 2006.
- [3] Ambient Networks Project. D07-A.2 - Draft System Description. Technical report, Janeiro 2007.
- [4] Claude Castelluccia. Hmipv6: A hierarchical mobile ipv6 proposal. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 4(1):48–59, 2000.
- [5] L. B. de Paula e R. Villaca e F. L. Verdi e M. Magalhaes. Network composition in a next generation internet architecture. In *5th International Workshop on Next Generation Networking Middleware*, Ilha de Samos, Grécia, Setembro 2008.
- [6] G. Cristallo e C. Jacquenet. An approach to interdomain traffic engineering. In *Proceedings of XVIII World Telecommunications Congress*, Paris, França, 2002.
- [7] Ion Stoica e Daniel Adkins e Shelley Zhuang e Scott Shenker e Sonesh Surana. Internet indirection infrastructure. In *SIGCOMM '02: Proceedings of the 2002 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pages 73–86, Nova Iorque, NY, EUA, 2002. ACM Press.
- [8] Xiaoming Fu e Dieter Hogrefe e Henning Schulzrinne e Attila Bader e Cornelia Kappler e Georgios Karagiannis e Hannes Tschofenig e Sven Van den Bosch. Nsis: A new extensible ip signaling protocol suite. *IEEE Communications Magazine*, 43(10):133–141, Outubro 2005.
- [9] Augusto Neto e Eduardo Cerqueira e Anderson Rissato e Edmundo e Paulo Mendes. A resource reservation protocol supporting qos-aware multicast trees for next generation networks. In *Proceedings of the 12th IEEE Symposium on Computers and Communications*, pages 707–714, Aveiro, Portugal, Julho 2007.

- [10] Bengt Ahlgren e Jari Arkko e Lars Eggert e Jarno Rajahalme. A node identity inter-networking architecture. In *INFOCOM 2006: Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications*, pages 1–6, Barcelona, Espanha, 2006.
- [11] Nick Feamster e Jay Borkenhagen e Jennifer Rexford. Controlling the impact of bgp policy changes on ip traffic. Technical report, AT&T Research, Novembro 2001.
- [12] Li Xiao e Jun Wang e King-Shan Lui e K. Nahrstedt. Advertising interdomain qos routing. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications.*, 22(10):1949–1964, Dezembro 2004.
- [13] R. Pasquini e L. B. de Paula e F. L. Verdi e M. Magalhaes. Domain identifiers in a next generation internet architecture. In *IEEE Wireless Communications Networking Conference*, Budapeste, Hungria, Abril 2009.
- [14] Stefan Schmid e Lars Eggert e Marcus Brunner e Jorgen Quittek. *Autonomic Communication*, volume 3457 of *LNCS*, chapter TurfNet: An Architecture for Dynamically Composable Networks, pages 94–114. Springer Berlin, 2005.
- [15] Ioannis Psaras e Lefteris Mamas e Paulo Mendes. Qos control in next generation ip networks: An experimental analysis of flow-based and sls-based mechanisms. In *Workshop on Networking in Public Transport (WNEPT 2006)*, Waterloo, Canada, Agosto 2006.
- [16] Nick Feamster e Lixin Gao e Jennifer Rexford. How to lease the internet in your spare time. *SIGCOMM Computer Communication Review*, 37(1):61–64, 2007.
- [17] Ricardo B. Freitas e Luciano B. de Paula e Edmundo Madeira e Fábio L. Verdi. An approach to inter-domain qos management in next generation networks. In *Anais do XIV Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS 2009)*, 2009.
- [18] Eduardo Cerqueira e Luis Veloso e Augusto Neto e Marília Curado e Paulo Mendes e Edmundo Monteiro. *Real-Time Mobile Multimedia Services*, volume 4787/2007 of *Lecture Notes in Computer Science*, chapter Q3M – QoS Architecture for Multi-user Mobile Multimedia Sessions in 4G systems, pages 38–49. Springer Berlin, Setembro 2007.
- [19] Bradley Huffaker e Marina Fomenkov e Daniel J. Plummer e David Moore e K Claffy. Distance metrics in the internet. In *IEEE International Telecommunications Symposium (ITS)*, Natal, Brasil, Setembro 2002.

- [20] Fabio L. Verdi e Mauricio F. Magalhaes e Edmundo Madeira e Annikki Welin. Using virtualization to provide interdomain qos-enabled routing. *JOURNAL OF NETWORKS (JNW)*, 2(2):23–32, Abril 2007.
- [21] M. P. Howarth e P. Flegkas e G. Pavlou e Ning Wang e P. Trimintzios e D. Griffin e J. Griem and M. Boucadair e P. Morand e A. Asgari e P. Georgatsos. Provisioning for interdomain quality of service: the mescal approach. *IEEE Communications Magazine*, 43(6):129–137, Junho 2005.
- [22] Eduardo Cerqueira e Paulo Mendes e Edmundo Monteiro. Multi-user session control in the next generation wireless system. In *Proceedings of the 4th ACM International Workshop on Mobility Management and Wireless Access*, pages 148–157, Terromolinos, Espanha, Outubro 2006.
- [23] Luis Veloso e Paulo Mendes e Edmundo Monteiro. Mobility support of multi-user services in next generation wireless systems. In *Proceedings of the 26th IEEE International Performance Computing and Communications Conference*, pages 9–18, Nova Orleans, EUA, Abril 2007.
- [24] Zhi Li e Prasant Mohapatra e Chen-Nee Chuah. *LNCS NETWORKING 2005*, volume 3462, chapter Virtual Multi-Homing: On the Feasibility of Combining Overlay Routing with BGP Routing, pages 1348–1352. Springer Berlin, 2005.
- [25] Yaping Zhu e Rui Zhang-Shen e Sampath Rangarajan e Jennifer Rexford. Cabernet: Connectivity architecture for better network services. In *Proceedings Workshop on Rearchitecting the Internet*, Madri, Espanha, Dezembro 2008.
- [26] Jiayue He e Rui Zhang-Shen e Ying Li e Cheng-Yen Lee e Jennifer Rexford e Mung Chiang. Davinci: Dynamically adaptive virtual networks for a customized internet. In *Proceedings of the 4th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies*, Madri, Espanha, Dezembro 2008.
- [27] Matthew J. e Ngo Hung Q. e Qiao Chunming Ghosh, Joy e Beal. On profiling mobility and predicting locations of wireless users. In *REALMAN '06: Proceedings of the 2nd international workshop on Multi-hop ad hoc networks: from theory to reality*, pages 55–62, Nova Iorque, NY, EUA, 2006. ACM.
- [28] Brian Hayes. Cloud computing. *Commun. ACM*, 51(7):9–11, 2008.
- [29] Verizon Communications Inc. Verizon communications 2008 annual report. <http://investor.verizon.com/financial/annual/2008/index.html>, Acessado em 13/04/2009.

- [30] Gary Kim. Surprise: P2p isn't the biggest bandwidth hog. IP Business News, "http://www.ipbusinessmag.com/articles.php?issue_id=39&article_id=199" Acessado em 13/04/2009, Agosto 2007.
- [31] F. e Karla I. e Litjens R. e Meago F. e Haitao Tang e Veronesi R. Magnusson, P. e Berggren. Multi-radio resource management for communication networks beyond 3g. In *Vehicular Technology Conference, Dallas, EUA*, Setembro 2005.
- [32] P. Nikander. Applying host identity protocol to the internet addressing architecture. In *SAINT'04: Proceedings of the International Symposium on Applications and the Internet*, page 5, Tóquio, Japão, 2004.
- [33] C. e Swinnen L. e Bonaventure O. e Uhlig S. Quoitin, B. e Pelsser. Interdomain traffic engineering with bgp. *IEEE Communications Magazine*, 41(5):122–128, Maio 2003.
- [34] International Telecommunication Union Telecom Standardization Sector. Next generation networks - frameworks and functional architecture models, general overview of ngn (itu-t y.2001). Technical report, International Telecommunication Union, Geneva, Suíça, Dezembro 2004.
- [35] James D. Solomon. *Mobile IP: the Internet unplugged*. Prentice-Hall, Inc., NJ, EUA, 1998.
- [36] Alessandro Vázquez, Alexei e Pastor-Satorras e Romualdo e Vespignani. Large-scale topological and dynamical properties of the internet. *Physical Review E*, 65(6), Junho 2002.
- [37] W. Wong and R. Pasquini e R. Villaca e L. B. de Paula e F. Verdi e M. Magalhaes. A framework for mobility and flat addressing in heterogeneous domains. In *Proceedings of the 25th Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems*, Belém, Brasil, Junho 2007.
- [38] Walter Wong. Proposta de implementação de uma arquitetura para a internet de nova geração. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Julho 2007.
- [39] Robert H'obbes Zakon. Hobbes' internet timeline v8.2. <http://www.zakon.org/robert/internet/timeline/>, Acessado em 13/04/2009.