

## A utilização e o Gerenciamento de Infraestruturas Virtuais

### Professor:

Guilherme Piegas Koslovski<sup>1</sup>  
(gkoslovski@gmail.com)

### Resumo:

Infraestruturas Virtuais (Virtual Infrastructures - VIs) emergiram como resultado da combinação de tecnologias para virtualização de recursos computacionais e para virtualização de recursos de comunicação. O aprovisionamento dinâmico de recursos computacionais já havia sido consolidado pelas Nuvens Computacionais (Cloud Computing), enquanto que recentemente, as Nuvens de Comunicação (Cloud Networking) introduziram a entrega de canais virtuais de comunicação como um serviço, de forma similar com a abordagem utilizada pelas Nuvens Computacionais. Através da combinação dessas tecnologias, o conceito de VIs está transformando a Internet em um amplo conjunto de recursos virtuais através do qual serviços de computação, armazenamento e comunicação podem ser reservados e aprovisionados dinamicamente, para diferentes usuários e aplicações. Usuários e provedores de serviço têm explorado as novas oportunidades de negócios e serviços identificados em VIs. Para usuários, a flexibilidade introduzida pelas tecnologias de virtualização permite que a composição das VIs seja alterada durante o período de execução, visando atender os requisitos de desempenho e custo das aplicações. Provedores de serviço podem agregar valor ao seu negócio oferecendo funcionalidades relacionadas com redes virtuais, enquanto maximizam a utilização de seu substrato computacional. Juntamente com as vantagens, uma série de desafios também podem ser identificados devido a total abstração dos recursos físicos, ao elevado número de recursos disponíveis, e a dificuldade em migrar aplicações já consolidadas para a Nuvem. Nesse contexto, o objetivo deste curso é contextualizar o surgimento do conceito de VI e discutir algumas vantagens e dificuldades em sua utilização e gerenciamento.

---

<sup>1</sup> Doutor em Informática pela École Normale Supérieure (ENS) de Lyon, França (2011). Mestre em Computação pelo Programa de Pós-graduação em Informática (PPGI) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, 2008), e Bacharel em Informática pela mesma instituição (2006). Professor do Curso de Tecnologia em Redes de Computadores da UFSM.

### 3.1. Introdução

---

A Internet está constantemente evoluindo, transformando-se de uma rede de comunicação em um sistema de computação, armazenamento e comunicação. Atualmente, usuários podem reservar e utilizar recursos e serviços seguindo um modelo de reserva *pay-as-you-go*, no qual os recursos são tarifados de acordo com a capacidade reservada e seu tempo de utilização [Buy09]. A maturidade da virtualização de recursos computacionais, bem como os conceitos e tecnologias investigados em Grades Computacionais contribuíram para o aparecimento de conceitos como os explorados em Nuvens Computacionais, permitindo que usuários reservem somente os recursos necessários para a execução de suas aplicações [RBL<sup>+</sup>09]. Alugando somente os recursos computacionais necessários, no momento exato em que serão utilizados, as empresas podem reduzir o custo de manutenção das infraestruturas de Tecnologia da Informação (TI), diminuindo os custos de gerenciamento e aquisição de recursos, como servidores e licenças de software. Observa-se que cada vez mais empresas estão optando pela substituição de suas infraestruturas de TI por serviços oferecidos nas Nuvens Computacionais [RM10].

Até recentemente, técnicas de virtualização eram aplicadas somente na virtualização de recursos computacionais e de armazenamento. O conceito de Nuvens de Comunicação tem mudado este cenário, propondo o provisionamento dinâmico de canais virtuais de comunicação para interconectar os recursos computacionais já virtualizados [GEN] [HIP] [SAI] [GEY]. Uma combinação dos conceitos e tecnologias explorados em Nuvens Computacionais e em Nuvens de Comunicação permite a criação de uma infraestrutura completamente virtualizada (recursos computacionais e de rede), alocada sobre uma estrutura física distribuída. Nesse contexto, uma Infraestrutura Virtual (*Virtual Infrastructure - VI*) é uma infraestrutura de TI e rede completamente virtualizada, que apresenta os mesmos recursos de uma infraestrutura física, mas na verdade compartilha o substrato físico com outras VIs durante um determinado período de tempo.

O provisionamento dinâmico de recursos virtualizados permite que os componentes de uma VI alterem sua capacidade durante o tempo de execução. Sobretudo, um recurso pode estar presente apenas em estágios específicos do ciclo de vida de uma VI. Observa-se que uma VI é uma entidade elástica. Seus recursos computacionais e de rede podem ser definidos de uma forma complexa, modelada de acordo com os requisitos dos usuários [AKV10] [THKA<sup>+</sup>10]. É sabido que o desempenho de uma aplicação pode variar durante sua execução devido a alterações na carga de trabalho (aumento ou diminuição), pico de solicitações, entre outras razões [ARSS06, AB10]. Como as VIs são entidades maleáveis, elas podem ser adaptadas para acomodar essas variações dinâmicas. Mais especificamente, os recursos de uma VI, tanto computacionais quanto de comunicação, podem ter sua capacidade modificada (por exemplo, aumento da largura de banda, redimensionamento da memória), bem como novos recursos podem ser adicionados, removidos ou migrados.

A maleabilidade dos recursos, a abstração do substrato físico e a existência de diversos provedores de serviço, tornam o gerenciamento de VIs (especificação, alocação, instanciamento, e liberação de recursos) uma tarefa complexa, que atualmente é foco de di-

versas pesquisas e soluções comerciais. Espera-se que um mecanismo de gerenciamento de VI atenda as expectativas de usuários e provedores de serviço. Usuários desejam modelar suas aplicações, traduzindo eficientemente os requisitos de desempenho em definições de máquinas virtuais e canais de comunicação virtuais [THKA<sup>+</sup>10]. Além disso, esperam acompanhar a execução de sua aplicação e interagir, seja automaticamente através da definição de políticas, ou explicitamente, através da solicitação de alteração na configuração inicial. Analisando as expectativas dos provedores de serviço, espera-se que os recursos físicos (computacionais e de comunicação) sejam utilizados eficientemente quanto ao custo e fragmentação [KSGV11].

Este curso apresenta uma definição do conceito de Infraestruturas Virtuais, descrevendo sua composição, elementos básicos e principais funcionalidades. Em um segundo momento, discute o processo de gerenciamento de VIs, apresentando algumas iniciativas de pesquisa e soluções comerciais existentes. Desta forma, a Seção 3.2. apresenta o caminho percorrido envolvendo técnicas de virtualização, Nuvens Computacionais e Nuvens de Comunicação. O conceito de VI e sua composição são definidos na Seção 3.3., enquanto que na Seção 3.4. discute-se sua utilização e gerenciamento. A Seção 3.5. apresenta as considerações finais deste curso.

## **3.2. O longo caminho até infraestruturas virtuais**

---

O conceito de Infraestruturas Virtuais emergiu da combinação de tecnologias de virtualização (recursos computacionais e redes), de conceitos explorados em Grades Computacionais, e do modelo de serviço sob demanda explorado em Nuvens Computacionais. Nesta seção, revisamos as principais definições e conceitos relacionadas com infraestruturas virtuais.

### **3.2.1. Tecnologias de virtualização**

A virtualização de um recurso consiste na desmaterialização de sua capacidade física e funcional, e em sua representação através de entidades e serviços virtuais [MG09]. Essa tecnologia tem sido estudada durante décadas em diversos contextos, como para virtualização de aplicações, sistemas, armazenamento, computação e redes. Atualmente, infraestruturas de Tecnologia de Informação (TI) têm usado a virtualização para consolidar os recursos computacionais e para diminuir os custos administrativos [VMW09]. Diferentes serviços, com requisitos específicos e distintos, podem ser alocados em um único elemento ou substrato computacional, compartilhando a capacidade dos recursos físicos. Essa consolidação reduz custos com consumo de energia, equipamentos de refrigeração, administração e gerenciamento, enquanto aumenta a possibilidade de exploração e utilização do substrato [Mic09]. Além desses fatores, a virtualização também permite isolamento e proteção: com a abstração do hardware e o acesso controlado, a virtualização garante que os serviços oferecidos em entidades virtuais permanecem completamente isolados.

As tecnologias atuais exploram quatro paradigmas de virtualização: abstração, particionamento, agregação e transformação [GERL<sup>+</sup>10].

- *Abstração (1:1)* representa a classe de recursos físicos que são expostos como uma única entidade virtual, podendo ser reservada e configurada unicamente por um usuário (por exemplo, o modo de reserva explorado pela plataforma computacional Grid'5000 [CCD<sup>+</sup>05]).
- O *Particionamento (1:N)* de um recurso físico em N recursos virtuais é o principal paradigma explorado atualmente para a virtualização de infraestruturas de TI. Os N recursos virtuais compartilham a capacidade e as funcionalidades do recurso físico.
- A *Agregação (N:1)* consiste no agrupamento de um conjunto de recursos físicos (TI ou comunicação) e sua exposição combinada como uma única entidade virtual, realizando uma união de suas capacidades e funcionalidades.
- *Transformação (N:M)* é uma combinação dos paradigmas de particionamento e de agregação. As entidades virtuais expostas por recursos computacionais particionados podem ser combinadas independentemente da fonte física de compartilhamento.

Esses paradigmas são explorados em diferentes níveis de uma infraestrutura de TI, entre eles hardware, sistemas operacionais, linguagens de programação, e equipamentos de comunicação. Este curso discute, em especial, as tecnologias de virtualização de recursos computacionais e de recursos de comunicação em virtude da sua importância para o surgimento do conceito de Infraestruturas Virtuais.

### 3.2.2. Virtualização de recursos computacionais

No início da década de 60, Goldberg explorou as tecnologias de virtualização para compartilhar o poder computacional dos grandes mainframes [PG73]. Até o início dos anos 2000, a maioria das tecnologias de virtualização permaneceram sendo aplicadas somente nestas plataformas computacionais, não sendo amplamente exploradas pela academia e indústria. Justifica-se a não presença da virtualização neste período devido ao decréscimo nos valores de aquisição dos microprocessadores e ao desenvolvimento de sistemas operacionais capazes de executar múltiplas tarefas simultaneamente, o que permitia a obtenção de um custo-benefício satisfatório com as soluções existentes. Esse panorama mudou nos últimos anos motivado pelo salto no poder computacional das novas plataformas e sua combinação com uma maior necessidade de flexibilidade na execução de aplicações.

A virtualização tornou-se uma alternativa para superar algumas das dificuldades e limitações encontradas em hardware e sistemas operacionais, como a dependência da plataforma física e uma ineficiente utilização das plataformas computacionais paralelas. Atualmente, o paradigma de particionamento (1:N) tem sido explorado para compartilhar

o poder computacional através da representação de diversas entidades abstratas, conhecidas como Máquinas Virtuais (MVs) [RG05]. Cada máquina virtual oferece características, serviços e interfaces semelhantes às aquelas oferecidas pelo hardware físico (por exemplo, CPU, memória e dispositivos de I/O). Neste cenário, uma camada de abstração, denominada Monitor de Máquinas Virtuais (MMVs), é responsável pelo acesso e compartilhamento dos recursos físicos. Alguns dos MMVs atuais exploram a virtualização de CPU, memória e dispositivos de I/O. Nos próximos parágrafos revisamos brevemente algumas das técnicas exploradas pelos MMVs.

### 3.2.2.1. Virtualização de CPU

Inicialmente, a arquitetura x86 não foi projetada para ser virtualizada, ou seja, não permitia o compartilhamento de um único recurso físico entre múltiplas máquinas virtuais. Embora essa arquitetura defina quatro níveis de privilégios de execução, os sistemas operacionais assumiam uma execução exclusiva e isolada, usando por padrão o maior nível de privilégio, o nível 0. Desta forma, o processo de virtualização dessa arquitetura requereu a definição e a utilização de uma camada de virtualização posicionada abaixo do sistema operacional. Mesmo com a introdução desta camada, algumas instruções não puderam ser virtualizadas devido à sua dependência ao nível de privilégio de execução (elas somente podem ser executadas no nível 0). Quando executadas em um menor nível, elas devem ser reescritas pelo MMV para posterior execução.

Nos últimos anos, as pesquisas em virtualização tentam superar as limitações da arquitetura x86 introduzindo novos conceitos e consequentemente novas tecnologias. O cenário atual da virtualização de CPU pode ser decomposto em três categorias principais [VMW10]: virtualização completa; virtualização em nível de sistema operacional e paravirtualização; e virtualização assistida por hardware. Essa classificação é resumida pela Tabela 3.1.

**Virtualização completa (*full virtualization*):** esta tecnologia, baseada na simulação dos recursos físicos, não necessita de nenhuma atualização ou modificação no sistema operacional virtualizado ou nos softwares em execução nas máquinas virtuais. Instruções e operações que não podem ser virtualizadas são traduzidas em instruções reais da arquitetura física para posterior execução. Mais especificamente, a virtualização completa é a única técnica de virtualização que não necessita de assistência de hardware ou de atualizações nos sistemas operacionais virtualizados.

As soluções VirtualBox, VMware, QEMU, e Microsoft Hyper-V Server são exemplos de implementações com suporte à virtualização completa. VMware combina a virtualização completa com uma tradução binária realizada em tempo real [SVL01]. Este processo traduz partes do código do núcleo do sistema operacional substituindo instruções privilegiadas por sequências de operações específicas da arquitetura física, que possuem o mesmo objetivo. QEMU utiliza uma abordagem semelhante, também utilizando tradução binária dinâmica para emular um processador, mas oferece um modo de execução intermediário que combina execução nativa com tradução binária. Uma das particularidades do QEMU é sua capacidade de executar em qualquer computador sem a necessidade

de privilégios administrativos. A tecnologia explorada pela solução Microsoft Hyper-V Server é baseada em partições virtuais. Cada partição pode ser vista como uma máquina virtual, na qual um sistema operacional virtualizado pode ser executado. Similarmente as outras soluções, as operações que necessitam acesso privilegiado ao hardware são dinamicamente interceptadas e traduzidas em operações nativas do hardware hospedeiro.

**Virtualização em nível de sistema operacional e paravirtualização (*operating system-level virtualization and paravirtualization*):** esta técnica de virtualização explora a utilização de múltiplos espaços de usuários (*user-spaces*) oferecidos por alguns núcleos de sistemas operacionais. Ao invés de utilizar diretamente as instruções de hardware, os sistemas operacionais virtualizados utilizam uma API exposta pelo núcleo do MMV para executar as instruções normais do sistema operacional hospedeiro. Consequentemente, a interface exposta para os sistemas operacionais hospedados é mais limitada que a interface real do hardware. Implementações como OpenVZ, UML, Linux-VServer, e Jails exploram esta técnica de virtualização, também conhecida como *containers*.

Um pouco diferente da abordagem discutida no parágrafo anterior, a técnica de paravirtualização [WSG02] [BDF<sup>+</sup>03], aplicada em arquiteturas x86, permite que os sistemas operacionais virtualizados tenham conhecimento sobre a existência da máquina virtual. Essa abordagem requer modificações nos sistemas hospedados para introduzir chamadas de sistema específicas (as *hypercalls*, que retornam o controle da execução para o MMV) objetivando a redução da sobrecarga na execução de instruções que dependem da arquitetura física (por exemplo, a sobrecarga introduzida pela interceptação e reescrita realizadas pela técnica de virtualização completa).

**Virtualização assistida por hardware (*hardware-assisted virtualization*):** essa técnica pode ser vista como o reflexo dos esforços em pesquisa e desenvolvimento realizados pelas indústrias para contribuir com a implementação e utilização de virtualização. Algumas das arquiteturas recentemente divulgadas, como Intel VT-x e AMD-V introduziram um novo modo de execução para permitir que MMVs executem diretamente sobre o hardware virtualizado, possuindo o mais alto privilégio de execução (também conhecido como privilégio abaixo do nível 0). Neste cenário, as requisições privilegiadas executadas por sistemas hospedados são diretamente interceptadas e direcionadas para o MMV. Técnicas como tradução binária dinâmica e paravirtualização não são mais requeridas, e consequentemente, os sistemas operacionais hospedados não necessitam de modificações. Monitores de máquinas virtuais como Xen, VMware, KVM e Microsoft Hyper-V oferecem implementações que exploram a virtualização assistida por hardware.

### 3.2.2.2. Virtualização da memória

A virtualização da memória RAM é considerada uma das partes críticas no processo de implementação de um MMV [BDF<sup>+</sup>03]. O modelo tradicional utilizado pelos MMVs é a construção de uma imagem espelho da estrutura de gerenciamento da memória das máquinas virtuais. Através desta informação, um MMV pode controlar o acesso

Categoria	Principais tecnologias	Vantagens	Pontos fracos
Virtualização completa	tradução, emulação	não requer modificações em sistemas operacionais e aplicações hospedadas; isolamento	sobrecarga na execução
Virtualização em nível de sistema operacional e paravirtualização	sistema operacional supervisor ( <i>hypervisor</i> )	melhor performance em comparação com virtualização completa	necessidade de modificações nos sistemas operacionais hospedados
Virtualização assistida por hardware	suporte direto à virtualização oferecido pelo hardware	não requer alterações nos sistemas operacionais hospedados	sobrecarga na execução de algumas operações de I/O

**Tabela 3.1: Resumo das principais tecnologias de virtualização de CPU..**

físico a memória, conhecer as páginas ativas, e conseqüentemente, o mecanismo de paginação [Wal02]. Essa técnica pode introduzir sobrecarga em sistemas operacionais hospedados que acessem e modifiquem frequentemente as páginas de memória. Pesquisas indicam que futuramente a virtualização de memória será assistida ou até mesmo controlada por hardware para acelerar o controle e acesso [RG05].

### 3.2.2.3. Virtualização dos dispositivos de I/O

O compartilhamento dos dispositivos físicos entre as máquinas virtuais hospedadas requer um controle de acesso eficiente, que garanta a distribuição da capacidade de forma igualitária entre os sistemas operacionais virtualizados. Ao mesmo tempo, é necessária a garantia de isolamento e proteção no acesso aos dispositivos. As informações manipuladas por uma máquina virtual não podem ser consultadas ou alteradas por outra MV que esteja em execução sobre o mesmo hardware.

Algumas implementações utilizam a técnica de emulação de dispositivos, propondo a definição de um conjunto universal de controladores de acesso (*drivers*) que aumentaria a portabilidade entre plataformas [SVL01] [VMW10]. Outras propostas expõem um conjunto de dispositivos abstratos, através dos quais o acesso pode ser controlado pelo MMV via memória compartilhada e descritores de *buffers* assíncronos, similares ao processo utilizado nas chamadas de interrupção de sistemas operacionais tradicionais [BDF<sup>+</sup>03]. Um exemplo dessa técnica é visto na virtualização das interfaces de rede (NICs), em que redes virtuais, incluindo comutadores e pontes, podem ser implementados em um único hardware hospedeiro [SVL01] [VBPAK09].

As direções futuras de virtualização de I/O seguem a mesma linha descrita como alternativa para acelerar a virtualização da memória. Espera uma implementação diretamente em hardware, para diminuir a sobrecarga imposta pela emulação e técnicas de abstração.

### 3.2.3. Virtualização de recursos de comunicação

A virtualização de recursos de comunicação tem sido explorada para permitir a alocação de múltiplas redes virtuais sobre uma topologia física distribuída [4WA]. De



forma análoga com a virtualização de recursos computacionais, esta tecnologia permite o compartilhamento dos recursos físicos, neste caso canais de comunicação e equipamentos de transmissão, entre as redes virtuais hospedadas. Sua aplicabilidade tem sido estudada em camadas distintas do modelo de referência OSI. As principais tecnologias abordadas são revisadas nos próximos parágrafos, organizadas em quatro categorias principais: *Local Area Networks (LANs)* virtuais, *Virtual Private Networks (VPNs)*, *overlays*, e redes programáveis.

### 3.2.3.1. LANs virtuais

LANs virtuais (ou VLANs) são redes logicamente isoladas que coabitam em um único comutador central [BSL<sup>+</sup>99]. VLANs foram inicialmente projetadas para reduzir o domínio de colisão de segmentos interconectados por concentradores em LANs. Tipicamente, esta tecnologia de virtualização opera nas camadas 2 e 3 do modelo OSI. Com a introdução dos comutadores, o problema de colisão foi contornado, e VLANs tornaram-se uma alternativa para a redução dos domínios de difusão.

Inicialmente, esta tecnologia de virtualização não permitia o controle de tráfego, somente a definição de prioridade na transferência [NBBB98]. Atualmente, novos comutadores e roteadores propuseram um conjunto de operações para permitir a configuração dos equipamentos, visando a garantia da qualidade de serviço [BTMFA09].

### 3.2.3.2. VPNs

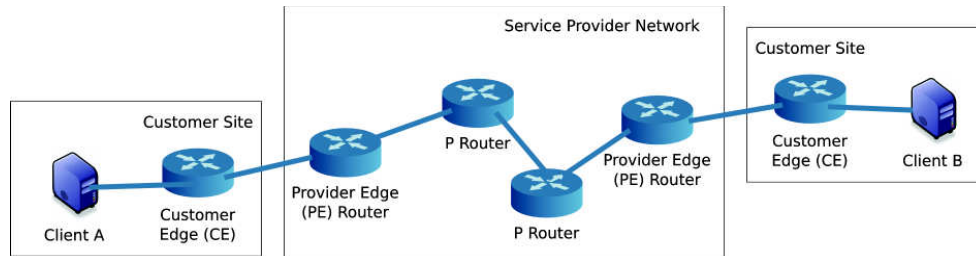
Uma Rede Privada Virtual (*Virtual Private Network - VPN*) é uma rede de comunicação utilizada para interconectar um ou mais centros computacionais, distribuídos sobre uma *Wide Area Network (WAN)*, através do estabelecimento de túneis privados sobre a infraestrutura física de comunicação [BWHH99] [RR06]. Inicialmente, VPNs foram introduzidas para permitir uma comunicação segura, que permitisse uma troca de dados confiável (camada 2 do modelo OSI), e em alguns casos, para acelerar o processo de roteamento (camada 3 do modelo OSI).

Usualmente, o provedor de serviço (*Service Provider - SP*) é responsável pelo estabelecimento da VPN, que é configurada respeitando um acordo de nível de serviço (*Service Level Agreement - SLA*) em que o usuário identifica o nível e os requisitos de confidencialidade e segurança que são necessários. Um exemplo deste cenário é a utilização de VPNs para o estabelecimento de túneis virtuais seguros para interconectar filiais de empresas. Um túnel criptografado, garantiria que um interceptador não conseguisse identificar e acessar diretamente as informações transmitidas.

VPNs são compostas e estabelecidas considerando três componentes principais: *Customer Edges (CE)*, *Provider Edge routers (PE)* e *P routers* [AM05], conforme apresentado na Figura 3.1. *Customer Edges* representam o ponto de acesso dos clientes, ou mais especificamente, a fonte e o destino das transmissões. *Provider Edges* são os pontos de entrada da infraestrutura de comunicação mantida pelo provedor de serviço, enquanto *P routers* são os roteadores internos desta infraestrutura, que usualmente não são conhe-



cidos pelos usuários.



**Figura 3.1: Representação dos componentes básicos de uma VPN. Os *Customer Edges (CEs)* são localizados no domínio do cliente. Os *Providers Edge routers (PEs)* e os *P routers* são localizados no domínio administrativo do provedor de serviço..**

VPNs podem ser estabelecidas em várias camadas do modelo de referência OSI, explorando os protocolos e as funcionalidades disponíveis.

**Camada 1:** A virtualização de componentes de comunicação da camada 1 do modelo OSI, como implementado em *Optical Cross-connect (OXC)*, ou comutadores *Time-Division Multiplexing (TDM)*, permite a composição e realização de L1VPNs [Tak07]. Por definição, uma VPN de camada 1 utiliza a tecnologia GMPLS RSVP-TE para sinalização e estabelecimento de um circuito entre os roteadores do provedor de serviço [FRP<sup>+</sup>08]. *Generalized Multiprotocol Label Switching (GMPLS)* é uma extensão da arquitetura MPLS que foi definida para suportar o encaminhamento de pacotes baseado em etiquetas. Em sua arquitetura original, MPLS assume que os roteadores possuem um plano de encaminhamento que é capaz de reconhecer o próximo destino de um pacote recebido. A extensão desenvolvida em GMPLS inclui a utilização de roteadores que não encaminham pacotes baseados em etiquetas, mas que definem o próximo passo através da prévia configuração de uma porta física, multiplexação de tempo ou frequência [Ber03]. Quanto a conectividade, VPNs da camada 1 podem ser classificadas em ponto-a-ponto (*Virtual Private Wire Services - VPWS*) e multi-ponto (*Virtual Private Line Services - VPLS*) [BA07].

**Camada 2:** VPNs estabelecidas na camada 2 do modelo OSI são usualmente realizadas sobre tecnologias Ethernet, ATM e Frame-Relay. Basicamente, existem dois tipos fundamentais de serviços que um provedor de VPN da camada 2 pode oferecer para um cliente: VPWS e *Virtual Private LAN Service*. Uma VPWS é um serviço que oferece uma VPN ponto-a-ponto, enquanto *Virtual Private LAN Service* é um serviço que emula a existência de uma LAN sobre uma WAN. Os protocolos utilizados para criar VPNs na camada 2 encapsulam os pacotes providos pela camada 3 em quadros ponto-a-ponto. Uma das vantagens de VPNs nesta camada é que os demais protocolos de camadas mais altas, permanecem inalterados, seguindo seu funcionamento usual. Em outras palavras, a virtualização na camada 2 é transparente para os protocolos da camada 3. *Point-to-point Tunneling Protocol (PPTP)* [HPV<sup>+</sup>99], *Layer 2 Tunneling Protocol (L2TP)* [TVR<sup>+</sup>99] e *Layer 2 Forwarding (L2F)* [VLK98] são exemplos de protocolos para instanciação de VPNs na camada 2.

**Camada 3:** Uma VPN da camada 3 é caracterizada pela utilização de IP e/ou MPLS para virtualizar uma rede compartilhada [CM05]. Os roteadores do provedor de serviço decidem como rotear o tráfego interno da VPN através das informações contidas nos cabeçalhos IP e MPLS. VPNs da camada 3 são implementadas de duas formas: baseadas nos roteadores do cliente ou baseadas nos roteadores do provedor de serviço. Em VPNs baseadas nas informações dos roteadores dos clientes, os túneis são criados e gerenciados nos CEs, sem a interferência do provedor de serviços. Os CEs encapsulam os pacotes para posterior envio dos roteadores do provedor de serviço. Neste cenário, três protocolos são identificados para a criação dos túneis: um protocolo de rede responsável por carregar os pacotes VPN (IP, por exemplo); um protocolo de encapsulamento como PPTP [HPV<sup>+</sup>99], L2TP [TVR<sup>+</sup>99], e IPSec [KS05]; e o protocolo passageiro original. Já em VPNs baseadas nos roteadores do provedor de serviço, a configuração e o estabelecimento dos túneis é de responsabilidade do provedor.

### 3.2.3.3. *Overlays*

Redes *overlays* são topologias construídas sobre outras topologias já existentes. Neste nível de virtualização, os canais de comunicação virtuais são logicamente estabelecidos sobre os canais físicos de comunicação, para interconectar recursos de TI já existentes. Atualmente, esta tecnologia tem sido explorada como uma alternativa para sobrepor limitações em diferentes contextos, como a resiliência de roteadores da Internet [ABKM01], implementar *multicasting* [Eri94], prover garantias de qualidade de serviço em comunicações [SSBK04], e prover serviços de entrega de conteúdo [KWZ01].

Redes *peer-to-peer*, usualmente construídas na camada 4 do modelo OSI, são exemplos de *overlays*, em que a comunicação é tipicamente realizada sobre uma rede IP. Um exemplo da exploração comercial de *overlays* é a solução proposta pela empresa Akamai para acelerar o tempo de resposta de aplicações executadas na Internet (<http://www.akamai.com>).

### 3.2.3.4. *Redes programáveis*

As redes programáveis permitem a configuração e programação dos equipamentos físicos através da utilização de uma API (*Application Programming Interface*) que idealmente oferece uma representação de alto nível dos serviços que podem ser prestados e implementados pela rede [CDMK<sup>+</sup>99]. Esta tecnologia suporta a construção de novas configurações de rede, permitindo a implementação e testes de novos protocolos e serviços. Duas escolas principais de implementação são identificadas em redes programáveis:

- *Open Signaling*: propõe uma distinção clara entre os planos de transporte, controle e gerenciamento. Para isso, define uma camada de abstração composta por um conjunto de interfaces independentes dos recursos físicos. Um exemplo atual desta abordagem é encontrado nos comutadores OpenFlow, que exploram uma configuração ascendente (abordagem *bottom-up*) para configurar as redes dinamicamente [MAB<sup>+</sup>08].

- *Active Network*: exploram uma configuração dinâmica baseada em informações coletadas sobre a transferência de pacotes em roteadores e comutadores. Esta configuração pode ser realizada em tempo real, adaptando a configuração da topologia de rede de acordo com o volume de informações transmitidas [TW02].

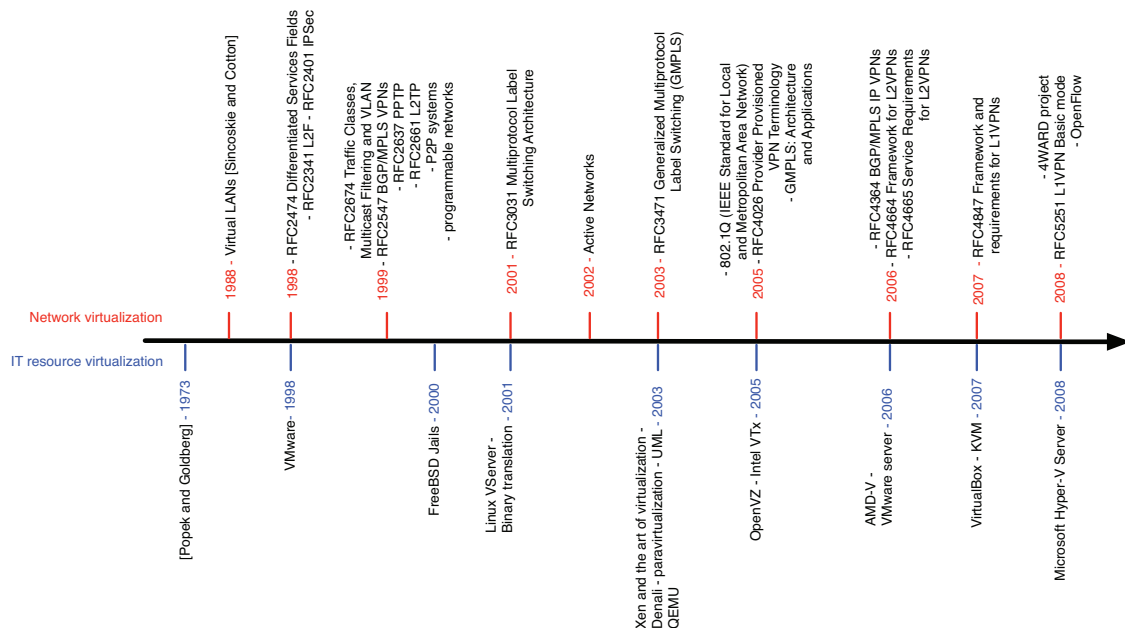
### 3.2.4. Combinando as tecnologias de virtualização

A virtualização é uma das principais alternativas para o aumento da flexibilidade da futura geração da Internet, garantindo seu crescimento e sucesso, enquanto previne a ossificação de sua arquitetura [Han06]. Ela permite o desenvolvimento de aplicações completamente independente da arquitetura física, e introduz a possibilidade do desenvolvimento de inovações através do novo nível de abstração introduzido entre o hardware real e os recursos expostos e em execução [AM05] [NKB<sup>+</sup>08] [KR10].

Os mecanismos de isolamento e controle implementados por diferentes monitores de máquinas virtuais permitem um uso e compartilhamento eficiente dos recursos físicos, embora em alguns casos introduzam um impacto no desempenho das aplicações em execução sobre as arquiteturas virtualizadas [WN10] [SDG11] [GCGV06]. Por serem desmaterializados, os recursos virtuais podem ser criados sob demanda, configurados, iniciados, pausados, salvos e até mesmo destruídos, como um conjunto de objetos programáveis. Essa característica permite que provedores de TI e de comunicação criem e gerenciem recursos e serviços virtuais dinamicamente [CJ09].

Nos últimos anos, a virtualização tem sido aplicada em diversos cenários. A Figura 3.2 apresenta uma linha do tempo descrevendo o progresso das principais tecnologias, projetos e implementações de virtualização de recursos computacionais e de comunicação. Seguindo esta linha do tempo podemos observar que a aplicação das tecnologias de virtualização tem migrado dos pontos extremos da Internet (como servidores e redes locais) para sua aplicação em recursos distribuídos. Atualmente, diferentes tecnologias de virtualização podem ser combinadas para oferecer um serviço mais complexo (como os paradigmas de Agregação e Transformação discutidos na Seção 3.2.1.). Por exemplo, dois provedores de serviço com recursos de comunicação heterogêneos (por exemplo, um expondo uma rede óptica na camada 1, enquanto o outro expõe um serviço de VPN na camada 2) podem cooperar para servir um único cliente, que desconhece as diferenças nas configurações físicas. Neste cenário, um operador externo pode orquestrar os recursos, alocando e compondo redes virtuais distribuídas sobre os provedores existentes [GEY11].

Uma das principais contribuições introduzidas pela virtualização é a possibilidade de reconfiguração dinâmica dos recursos. Recursos de TI podem ter sua capacidade de armazenamento, processamento, e memória redefinidas durante o processo de execução, enquanto os canais de comunicação virtuais podem ser controlados, adaptando a largura de banda necessária. Essa capacidade de reconfiguração dinâmica tem sido explorada por projetos e tecnologias recentes, principalmente em Nuvens Computacionais e Nuvens de Comunicação.



**Figura 3.2:** Uma linha do tempo apresentando a evolução das tecnologias de virtualização de recursos computacionais e de comunicação..

### 3.2.5. Nuvens Computacionais

A maturidade da virtualização de recursos computacionais e das tecnologias exploradas em Grades Computacionais [KF98] induziu o aparecimento de Nuvens Computacionais. Conceitos como organizações virtuais e serviços expostos através de interfaces transparentes foram inicialmente explorados in Grades Computacionais [FK97] [Fos01] [Fos05]. Uma Nuvem Computacional combina esses conceitos com tecnologias de virtualização e com modelos de negócio para permitir o acesso sob demanda a um conjunto de recursos configuráveis (servidores, armazenamento, aplicações e serviços) que podem ser rapidamente provisionados, utilizados e terminados [MG09] [Buy09] [RJKG11].

Desta forma, Nuvens Computacionais introduziram uma nova forma de entrega de serviços de TI, baseada em diminuição de custos, escalabilidade e provisionamento sob demanda, guiado pelos requisitos dos usuários. Explorando a flexibilidade oferecida pelas tecnologias de virtualização, elementos de TI são expostos como um conjunto de serviços (ou até mesmo recursos) que podem ser reservados por usuários durante um determinado período de tempo. Atualmente, usuários individuais, empresas, e instituições de ensino e de pesquisa instanciam recursos em Nuvens Computacionais para executar suas aplicações, explorando as vantagens oferecidas por este cenário, como por exemplo a diminuição do custo de execução [THKA<sup>+</sup>10] e o suporte a execuções com tolerância a falhas [KSGV11].

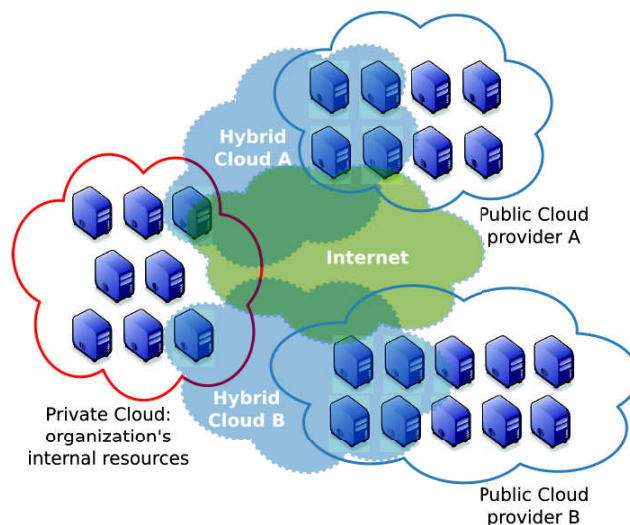
O modelo comercial explorado em Nuvens Computacionais difere do modelo tradicional de comercialização de recursos de TI pelo fato de demandar um menor volume de investimento inicial. Tradicionalmente, um usuário adquire um software ou hardware,

e explora sua capacidade respeitando as condições contratuais impostas pelo fornecedor ou fabricante (por exemplo, o número de licenças e o número máximo de execuções). Nuvens Computacionais propõem que recursos sejam reservados e utilizados sob demanda, somente quando necessário, seguindo o modelo *pay-as-you-go*.

É incontestável que a Computação em Nuvens está mudando a forma de utilização dos recursos na Internet. Essa tecnologia tem sido explorada por diversas instituições, e previsões para os próximos anos indicam que mais de 80% das infraestruturas de TI serão movidas para a Nuvem até o ano de 2020. Além disso, indicam que Nuvens serão mais acessíveis economicamente (o custo total de provedores de Nuvens Computacionais será de até 25% do custo total para o gerenciamento de um centro de dados tradicional), e oferecerão maior suporte aos quesitos de confiabilidade e segurança [RM10].

### 3.2.5.1. Tipos de Nuvens Computacionais

As Nuvens Computacionais são classificadas de acordo com a localização de seus servidores e o modo de acesso de seus usuários. A localização distingue recursos privados, que pertencem a uma única organização, e recursos públicos, localizados e disponíveis em um substrato distribuído, enquanto que a forma de acesso identifica os usuários e como eles utilizam os recursos disponíveis (reservando, alugando ou combinando). Uma classificação atual identifica três tipos principais de Nuvens: Nuvens Privadas (*Private Clouds*), Nuvens Públicas (*Public Clouds*) e Nuvens Híbridas (*Hybrid Clouds*) [ZCB10]. Para exemplificar esta classificação, a Figura 3.3 apresenta um cenário composto por uma Nuvem Privada, duas Públicas (A e B), e duas Híbridas.



**Figura 3.3: Uma classificação comum que define três tipos de Nuvens Computacionais: Privada, Pública e Híbrida..**

**Nuvens Privadas:** também conhecidas como Nuvens Internas, são construídas usando os recursos internos existentes em organizações de TI. A exclusividade de uso dos re-

curso computacionais é garantida aos membros da organização, induzindo uma maior confiabilidade e confidencialidade sobre informações e dados críticos. Usualmente, administradores de infraestruturas privadas possuem total controle sobre o desempenho, gerenciamento, fiabilidade, e segurança dos recursos. Diversas soluções, comerciais e de código aberto, podem ser utilizadas para o gerenciamento de Nuvens Privadas, como por exemplo VMware vCloud Director, OpenNebula, Xen Cloud Platform (XCP), Eucalyptus Systems, e Lyatiss CloudWeaver.

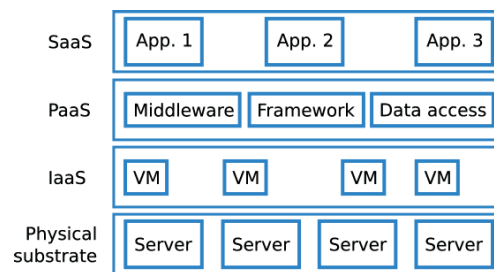
**Nuvens Públicas:** ou Nuvens Externas, são caracterizadas por exporem seus recursos computacionais sob a forma de serviços que podem ser contratados por usuários. Usualmente, o conjunto de recursos computacionais virtualizado está geograficamente distribuído em diversos centros computacionais. Em comparação com Nuvens Privadas, as Nuvens Públicas frequentemente oferecem um menor controle administrativo e uma menor garantia de segurança sobre as informações. Além disso, sua utilização requer o estabelecimento de um canal de comunicação para permitir o acesso aos recursos virtualizados. Exemplos de provedores de Nuvens Públicas compreendem Amazon EC2, Microsoft Windows Azure platform, Salesforce.com, 3Tera, Google App Engine, NetSuite, entre outros. Até o presente momento, o foco principal dos provedores de Nuvens Públicas é o fornecimento de recursos computacionais e de armazenamento. A interconexão virtual entre os recursos (por exemplo, entre as máquinas virtuais) apenas foi inicialmente explorada pelo provedor Amazon, mas a tarifação de sua utilização ainda é realizada pelo volume de dados transferidos, sem garantia de uma comunicação eficiente.

**Nuvens Híbridas:** em alguns momentos, as organizações podem explorar totalmente seus recursos computacionais disponíveis, e necessitam realizar uma reserva em provedores de Nuvens Públicas para completar o poder computacional necessário. Este cenário pode ocorrer durante picos de execução ou aumento de carga momentânea para ser processada. Desta forma, um conjunto de recursos oriundos de uma Nuvem Pública é interconectado com os recursos internos da organização, ou seja, com a Nuvem Privada. Este é o cenário representado pelas Nuvens Híbridas A e B na Figura 3.3. Usualmente, a comunicação entre a Nuvem Privada e a Nuvem Pública é realizada utilizando os recursos da Internet, e motivado pela segurança, as informações críticas são mantidas na Nuvem Privada.

### 3.2.5.2. Modelos de serviço

Nuvens Computacionais podem oferecer serviços virtualizados em diferentes níveis. Um conjunto de servidores virtualizados pode prover serviços de software, plataformas e infraestruturas [MG09] como detalhado na Figura 3.4. Os recursos virtualizados e distribuídos compõem o substrato físico (*Physical Substrate*) e são apresentados na parte inferior, enquanto que os níveis superiores representam os diferentes modelos de serviço expostos.





**Figura 3.4: Os modelos de serviço oferecidos por um provedor de Nuvens Computacionais em 2012.**

**Software como serviço (*Software as a Service - SaaS*):** representa o nível mais alto de abstração e permite a execução sob demanda de aplicações que estão alocadas em servidores remotos. Em contraste com o modelo de licenciamento utilizado em software tradicionais, SaaS é usualmente comercializado seguindo um modelo em que usuários pagam uma taxa referente apenas ao período em que utilizam o software [Jac05]. Exemplos de provedores de SaaS incluem Microsoft Online, Salesforce.com, Rackspace, SAP Business ByDesign, Google Apps, e NetSuite.

**Plataforma como serviço (*Platform as a Service - PaaS*):** o modelo PaaS oferece serviços (*frameworks*) que permitem o desenvolvimento e instânciação de aplicações. Os usuários selecionam as ferramentas necessárias para o desenvolvimento (por exemplo, desenho, modelagem, desenvolvimento, realização de testes, e integração de sistemas) sem a necessidade de instalação ou configuração local. Alguns provedores ainda oferecem serviços que permitem o gerenciamento automático da escalabilidade das aplicações. Google App Engine, Microsoft Windows Azure, e Force.com são exemplos de provedores de PaaS.

**Infraestrutura como serviço (*Infrastructure as a Service - IaaS*):** este modelo oferece Máquinas Virtuais como serviços sob demanda. Ao invés de adquirir novos equipamentos de TI para executar suas aplicações, os usuários podem reservar e configurar máquinas virtuais durante um determinado período de tempo. Usualmente, os provedores de IaaS interconectam as máquinas virtuais usando uma abordagem *best-effort*, sem oferecer garantia de uma comunicação eficiente, e sem expor as informações sobre a topologia de comunicação utilizada para interconectar os recursos. Exemplos de provedores de IaaS incluem Amazon EC2, GoGrid, Rackspace e Flexiscale.

### 3.2.6. Nuvens de Comunicação

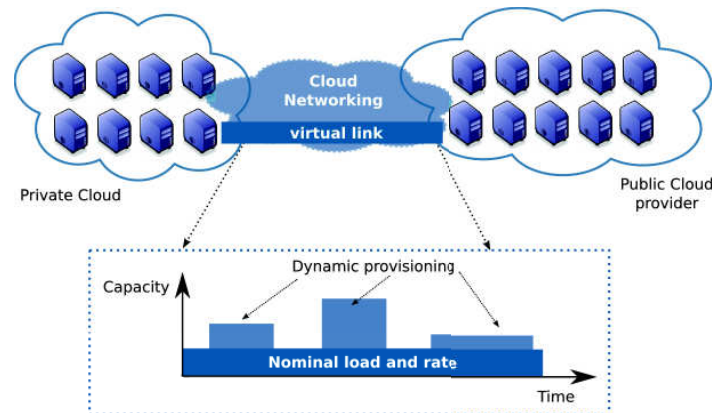
Embora as Nuvens Computacionais tenham consolidado o provisionamento sob demanda de recursos virtuais, em especial de máquinas virtuais, a interconexão eficiente entre os recursos não foi abordada. Os provedores de Nuvens instanciam um conjunto de



máquinas virtuais e interconectam utilizando uma abordagem em que a rede usualmente não é controlada (sem garantia de qualidade de serviço).

Esta abordagem é insuficiente para atender aplicações sensíveis à rede. Para essas aplicações, a ocorrência de um gargalo de comunicação ou até mesmo a ocorrência de um aumento temporário de latência entre os recursos distribuídos, pode comprometer a execução [KTHMVBP09]. Para contornar esta limitação, uma Nuvem de Comunicação define que os recursos de rede sejam controlados, instanciados e aprovisionados de maneira dinâmica e flexível [SAI]. Esta tecnologia propõe que os recursos de rede sejam aprovisionados da mesma forma que os demais recursos e serviços em Nuvens Computacionais, e que sejam tarifados de acordo com a capacidade reservada e utilizada.

A Figura 3.5 exemplifica o aprovisionamento dinâmico de um serviço de comunicação entre uma Nuvem Privada e uma Nuvem Pública. Um canal de comunicação virtual é reservado e aprovisionado dinamicamente para este fim. A capacidade pode variar durante o tempo de reserva motivado por um pico de dados a serem transferidos ou computados, o que requer mais capacidade que a originalmente aprovisionada. Durante a ocorrência deste pico, mais recursos (capacidade) são aprovisionados dinamicamente pelo provedor, para adaptar o serviço aos requisitos da aplicação.



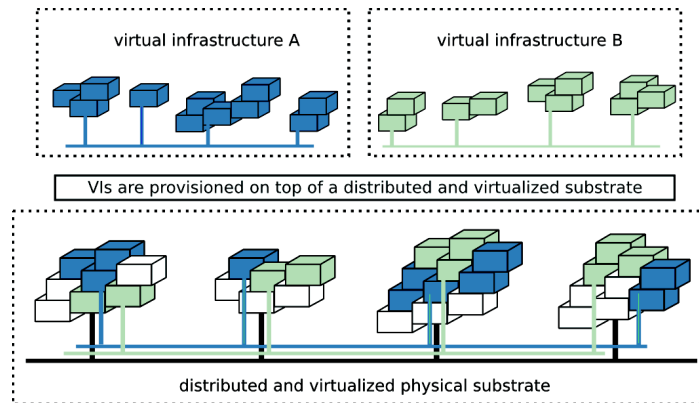
**Figura 3.5: Exemplo de Nuvens de Comunicação. Um canal de comunicação virtual é aprovisionado para interconectar uma Nuvem Privada e uma Nuvem Pública.**

Este exemplo foi discutido no contexto do projeto SAIL [SAI].

### 3.3. Infraestruturas Virtuais

O conceito de Infraestruturas Virtuais (Virtual Infrastructures - VIs) estende a definição original de IaaS para prover redes de computadores virtuais da mesma forma que recursos computacionais virtuais [SAI] [GEY] [GEN]. Com esta extensão, os recursos computacionais, de armazenamento e de comunicação disponíveis na Internet são abstraídos e desmaterializados, sendo expostos como um conjunto de serviços que podem ser dinamicamente reservados e aprovisionados [LVBP05] [RBL<sup>+</sup>09].

A Figura 3.6 ilustra este novo cenário: duas infraestruturas virtuais (A e B) estão alocadas sobre um substrato físico, distribuído e virtualizado, compartilhando a capacidade dos recursos de TI e de comunicação. Neste cenário, uma VI (por exemplo, a VI A) está completamente isolada e não tem conhecimento sobre a existência de outra VI.



**Figura 3.6: Duas Infraestruturas Virtuais estão alocadas sobre um substrato computacional virtualizado, compartilhando a capacidade de seus recursos físicos..**

### 3.3.1. Conceito

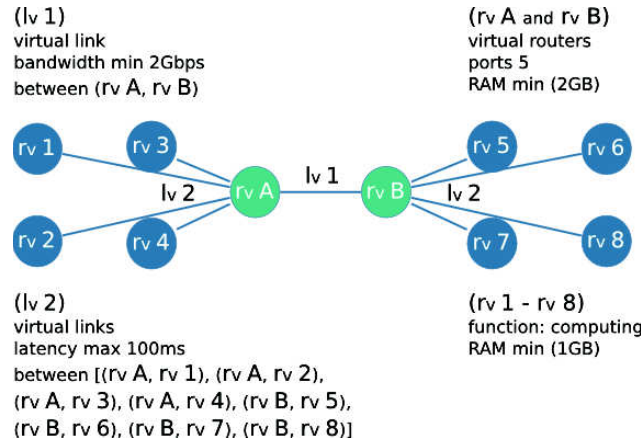
Define-se uma Infraestrutura Virtual como um grupo de recursos computacionais virtuais interconectados por uma rede de comunicação virtual [AKV10]. Através da combinação de virtualização de recursos computacionais com a virtualização de equipamentos de rede, um usuário de uma VI tem a ilusão de que está utilizando um conjunto de recursos privados, enquanto na realidade está usando um conjunto de recursos posicionados sobre uma infraestrutura física distribuída e virtualizada. Instâncias de Infraestruturas Virtuais são mantidas completamente isoladas.

Uma VI pode ser alocada sobre múltiplos sistemas de comunicação e computação que pertencem a diferentes operadores (ou domínios administrativos). Independente da topologia física e das tecnologias de virtualização aplicadas pelos diferentes provedores, o usuário possui uma visão de uma pilha regular de protocolos de comunicação. Ele pode se conectar a sua VI de qualquer localidade e executar suas aplicações da mesma forma como realiza em sua intranet ou até mesmo na Internet.

Uma VI pode ser formalmente representada como um grafo, onde os vértices possuem a capacidade de processamento de dados e as arestas são responsáveis pela sua movimentação. A Figura 3.7 ilustra esta representação formal apresentando uma infraestrutura virtual composta por um conjunto de máquinas virtuais que está interconectado por um conjunto de canais de comunicação virtuais. Esta figura ainda apresenta dois roteadores virtuais (vértices  $r_vA$  e  $r_vB$ ) que são usados para interconectar e realizar o controle de largura de banda entre os recursos virtuais (vértices  $r_v1$  até  $r_v8$ ). Cada aresta representa um canal de comunicação virtual (por exemplo,  $l_v1$  e  $l_v2$ ) que possuem diferentes configurações.

Uma das principais características de VIs é a possibilidade de composição e modelagem seguindo os requisitos das aplicações dos usuários [KVBPC08]. Diferentes tipos de informações e características podem ser informadas para cada elemento do grafo, de forma independente ou agregada:

- Atributos de tempo de reserva (data inicial e final) para cada recurso.
- Parâmetros para representar os requisitos computacionais como RAM, capacidade de armazenamento, e características do processador.
- O conjunto de software (por exemplo, sistemas operacionais) e as ferramentas (por exemplo, bibliotecas de comunicação e compiladores) que devem ser provisionados com os recursos.
- A funcionalidade do recurso (exemplo: um conjunto de recursos computacionais, ou um conjunto de recursos para armazenamento).
- Atributos para definir o nível de segurança e tolerância a falhas.
- Atributos comerciais que permitam a definição de custos de provisionamento.



**Figura 3.7: Exemplo da composição de uma VI representada através de um grafo. Os recursos virtuais de TI são representados pelos vértices do grafo, enquanto os canais virtuais de comunicação são representados pelas arestas..**

### 3.3.2. Composição de uma infraestrutura virtual

Basicamente, uma Infraestrutura Virtual é composta dos seguintes componentes: vNodes, vStorage, vRouters, vAccessPoints, e vLinks [AKV10] [Lya11]. Eles podem ser organizados individualmente ou em grupos. Seguindo uma análise com grafos, os vértices podem representar um grupo de vNodes e vRouters, e até mesmo incluir vLinks (em outras palavras, um vértice pode conter um subgrafo).

**vNode:** é uma máquina virtual que pode ser completamente customizada pelo usuário. O provisionamento é realizado de acordo com as configurações previamente informadas (por exemplo, configurações de CPU e RAM) e considera as aplicações e ferramentas solicitadas pelo usuário (sistemas operacionais, compiladores, bibliotecas de comunicação, entre outros).

**vRouter:** os roteadores virtuais são componentes especiais de uma VI que permitem a virtualização dos planos de controle, de dados, e de gerenciamento de uma rede. Usuários podem implantar e utilizar protocolos de roteamento customizados e configurar as disciplinas de ordenação de pacotes, de filtragem e de monitoramento. Devido à posição estratégica que os roteadores virtuais ocupam, eles podem concentrar o tráfego de uma VI e realizar o controle interno da largura de banda.

**vStorage:** a localização e a segurança dos dados são fatores críticos para diversas aplicações e usuários. Neste contexto, vStorages são máquinas virtuais especialmente configuradas que devem ser provisionadas sobre equipamentos físicos com capacidades especiais de armazenamento e que implementem uma das tecnologias de *Storage Area Network (SAN)*, *Direct-Attached Storage (DAS)*, ou *Network-Attached Storage (NAS)*. Os hospedeiros físicos devem possuir capacidade suficiente para acomodar e garantir o desempenho de armazenamento solicitada pelo usuário da VI.

**vAccessPoint:** pontos de acessos virtuais representam os pontos de entrada de uma VI. Eles permitem a interconexão dos componentes internos da VI com recursos externos e entre VIs distintas. Como servem de ponto de acesso, vAccessPoints podem ser configurados com funcionalidades distintas, como por exemplo realizar *Network Address Translation (NAT)*, balanceamento de carga, *firewall*, controle de acesso e criptografia.

**vLink:** os componentes de uma VI (vNodes, vRouters, vAccessPoints, vStorages e seus grupos) são interconectados por canais de comunicação virtuais (os vLinks). Cada vLink representa um caminho virtual temporário que é alocado sobre diferentes componentes físicos. Os vLinks podem ter sua largura de banda e latência definidas pelos usuários, e permitem o desenho do modelo e da topologia de rede necessária para interconectar todos os componentes internos.

### 3.4. Utilizando infraestruturas virtuais

---

Nuvens Computacionais e Infraestruturas Virtuais tornaram-se um foco atual de pesquisas em diversos contextos e aplicações. Para usuários, explorar os recursos disponíveis sob demanda, torna-se vantajoso, devido a possibilidade de reservar e alugar somente os recursos que são necessários para executar sua aplicação. Para provedores de serviço, a possibilidade de agregar valor a sua plataforma computacional através da

disponibilização de serviços temporários, leva a um melhor aproveitamento dos recursos computacionais.

Juntamente com a inovação introduzida pelos conceitos de Nuvens Computacionais, Nuvens de Comunicação e Infraestruturas Virtuais, um conjunto de desafios é identificado, necessitando o desenvolvimento de novas tecnologias, modelos e aplicações, que auxiliem no melhor aproveitamento prático dos conceitos propostos. Observa-se, principalmente, a dificuldade que usuários encontram em migrar aplicações já consolidadas para esta nova plataforma computacional abstrata. Usuários possuem aplicações que são executadas em computadores simples, aglomerados ou grades computacionais e necessitam de ajuda na migração do contexto de execução.

A abstração completa introduzida pela virtualização dos recursos e da topologia de rede, combinado com o indeterminismo dos requisitos de execução de aplicações em termos de recursos computacionais e de comunicação, transformam a especificação e a criação de infraestruturas virtuais em processos complexos. Um problema desafiante para provedores e usuários é a identificação dos requisitos necessários para a execução das aplicações e a consequente estimativa do número de recursos computacionais necessários.

Nesta seção discutimos alguns dos problemas e serviços relacionados com a utilização de infraestruturas virtuais. Inicialmente descrevemos o processo de especificação, exemplificando através da definição de uma linguagem para modelagem de VIs. Em um segundo momento, descrevemos como os recursos e requisitos informados pelos usuários, podem ser traduzidos, instanciados e entregues.

### 3.4.1. Especificação dos recursos

As aplicações computacionais diferem nos requisitos de configuração de hardware e software que são necessários para sua execução eficiente. Aplicações autônomas usualmente requerem apenas VIs com alto poder computacional, enquanto aplicações distribuídas acrescentam requisitos de comunicação com alta capacidade (alta vazão ou baixa latência). Os requisitos das aplicações distribuídas também podem variar de acordo com o padrão de comunicação utilizado. Algumas aplicações precisam transferir um elevado volume de dados (uma base de dados, por exemplo) para posterior execução, e em outro momento, apenas trocam pequenas mensagens para sincronia da execução. Já aplicações sensíveis a latência (como uma aplicação MPI - *Message Passing Interface*) necessitam de uma configuração de rede com garantias de isolamento e proximidade geográfica.

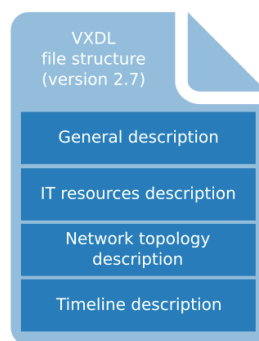
Diversos fatores podem influenciar na execução de uma aplicação distribuída, como a capacidade computacional necessária, a localização geográfica dos recursos, a localização dos servidores de dados, a distribuição e confidencialidade da informação e o volume de dados que devem ser processados. Além disso, o conceito de VIs introduz uma abstração completa dos recursos físicos, de sua composição e de sua localização geográfica. Todos estes fatores devem ser combinados no processo de especificação dos recursos necessários para a execução de aplicações em VIs.

Usualmente, soluções de gerenciamento de Nuvens Computacionais utilizam linguagens de especificação para facilitar a descrição, modelagem e configuração dos re-

curso. OGF Open Cloud Computing Interface (OCCI) [OCC], DMTF Open Virtualization Format (OVF) [DMT09], Rspec [RSp] e VXDL [KVBPC08], são exemplos de linguagens e interfaces que permitem essa especificação. No restante desta seção, discutimos o processo de especificação apresentando a linguagem VXDL (Virtual Infrastructure Description Language) que se distingue das demais pelo foco na descrição de VIs. VXDL é uma linguagem de modelização desenvolvida com o objetivo de unificar a descrição de recursos virtuais computacionais e de comunicação. A gramática definida em VXDL é simples, e permite uma descrição de alto nível da diversidade dos recursos virtuais (vNode, vAccessPoint, vRouters, vStorage, vLinks e seus grupos) e de suas características individuais (requisitos computacionais, de comunicação, funcionalidade, entre outros), de forma completamente independente da arquitetura física, o que permite a interoperabilidade e independência de provedores. Atualmente, VXDL é mantida por um fórum aberto, VXDLforum (<http://www.vxdlforum.org>), em que empresas e instituições de pesquisa podem trocar informações visando a padronização na definição de um modelo para VIs.

#### 3.4.1.1. A estrutura de uma especificação VXDL

A Figura 3.8 descreve a estrutura de uma especificação VXDL, conceitualmente composta por quatro partes principais, que representam todos os aspectos de uma VI:



**Figura 3.8:** A estrutura de uma especificação VXDL (versão 2.7)..

- Descrição genérica (*General description*): Esta parte do documento descreve os atributos genéricos e comuns para todos os componentes de uma VI. Fazendo uma análise com o modelo em grafo apresentado na Seção 3.3.1., esta parte do documento descreve as informações que são pertinentes para todos os recursos (vértices e arestas), como por exemplo o tempo de reserva, os requisitos de segurança, e a lista de usuários que está autorizada a acessar a VI. Estas informações podem ser redefinidas para cada recurso individualmente nas seções posteriores.
- Descrição dos recursos computacionais (*Virtual resources*): Seguindo com uma análise com o grafo de uma VI, esta segunda parte da estrutura define os recursos computacionais, ou seja, os vértices do grafo. Pode-se definir a configuração e



especificação exata de todos os recursos virtuais que compõem o modelo de uma VI (vNodes, vAccessPoint, vStorage, e vRouter). Além de informar atributos que definem o poder computacional e a configuração necessária, usuários podem especificar atributos que direcionam o provisionamento da VI, como por exemplo identificar uma localização geográfica específica (ou um provedor específico) e solicitar exclusividade sobre os recursos físicos (não compartilhamento).

- Descrição da topologia virtual de comunicação (*Virtual network topology*): As arestas do grafo, ou seja, os canais de comunicação virtuais, são descritas nesta parte do documento. Os vLinks podem ser estabelecidos entre pares de recursos virtuais (por exemplo, entre vNodes, entre um vNode e um vRouter) ou entre grupos de recursos (por exemplo, entre um vAccessPoint e um grupo de vNodes). Cada vLink pode ser individualmente descrito, e usuários podem definir os requisitos em termos de largura de banda e latência máxima permitida. Através da especificação dos canais de comunicação, os usuários podem definir o formato da topologia de rede interna de uma VI.
- Descrição da linha do tempo (*Virtual timeline*): A última parte de um documento VXDL descreve o aspecto maleável de uma VI. Durante a execução, a composição, a topologia e a configuração dos recursos podem ser alteradas para adaptar a infraestrutura virtual aos requisitos da aplicação. Definindo uma linha do tempo virtual, usuários podem identificar o exato momento em que os recursos serão explorados, como por exemplo, identificar quando uma transferência de dados ocorrerá, ou até mesmo o período necessário para a computação das informações.

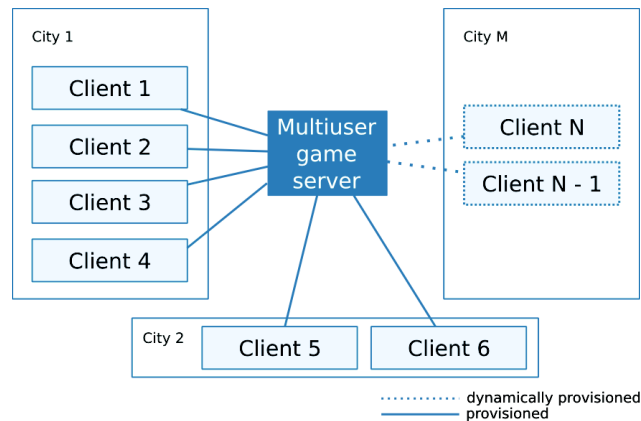
Uma especificação em VXDL pode ser composta de apenas algumas das partes descritas anteriormente, permitindo uma melhor adaptação ao cenário em questão (um provedor apenas de Nuvens de Comunicação, ou um provedor apenas de Nuvens Computacionais). Não é o objetivo deste curso descrever a gramática completa de VXDL, mas sim exemplificar a especificação de VIs utilizando este recurso. Maiores informações sobre a linguagem bem como documentos de introdução, casos de uso, modelos de VIs e outras informações podem ser encontradas diretamente no fórum de discussões.

#### 3.4.1.2. Definindo um servidor de jogos multiusuários

Para exemplificar a composição e especificação de uma infraestrutura virtual, selecionamos um caso de uso que foi discutido em projetos recentes [CAR] [HIP] [SAI]. O objetivo deste cenário é a especificação de um servidor de jogos que permita o acesso de diversos usuários geograficamente distribuídos. A infraestrutura necessária para hospedar o serviço de jogos será provisionada como um serviço oferecido por um provedor de infraestruturas virtuais. A Figura 3.9 apresenta o cenário de execução, em que um servidor virtual deve ser provisionado por um determinado período de tempo. Cada cliente (jogador) que deseja jogar deve conectar-se ao servidor de jogos. Para garantir uma boa experiência em termos de jogabilidade, é necessário o estabelecimento de um canal de comunicação virtual entre o ponto de acesso do jogador e o servidor de jogos. Este vLink deve ser dinamicamente provisionado respeitando a largura de banda especificada pelo



serviço de jogos. Os clientes estão localizados em diferentes cidades. As figuras pontilhadas representam os recursos que devem ser aprovisionados dinamicamente, enquanto as demais representam os recursos já instanciados e em execução.



**Figura 3.9: Exemplo de um serviço de jogos multiusuários hospedado em uma VI. Um canal de comunicação virtual deve ser estabelecido entre o servidor de jogos e cada usuário que deseja jogar..**

Uma descrição de alto nível de uma VI para suportar o serviço descrito deve conter informações como:

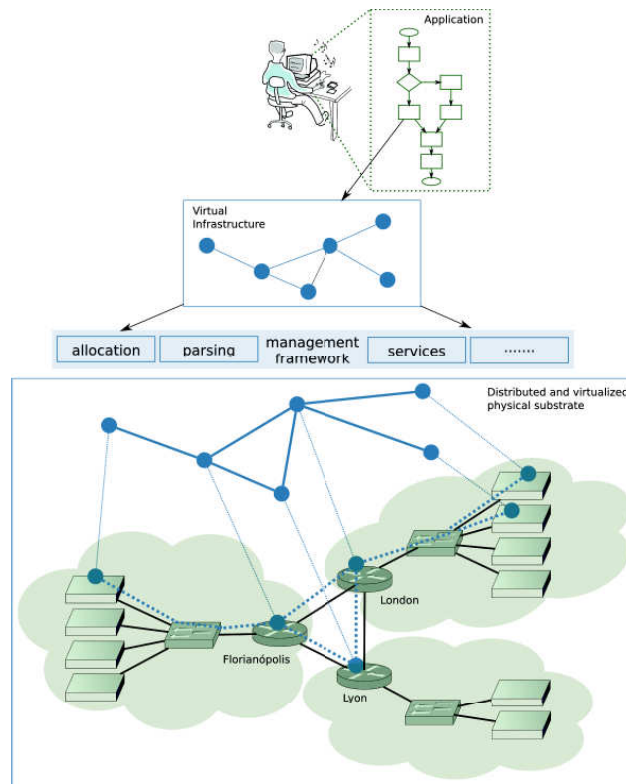
- A Infraestrutura Virtual é composta por um servidor de jogos (vNode) localizado em um equipamento que permita a conexão de 100 clientes (vAccessPoints) usando o protocolo de comunicação TCP.
- Requisitos do servidor de jogos: memória RAM de 8 GB e capacidade de armazenamento de 100 GB.
- Canais de comunicação (vLinks): 100 vLinks devem ser dinamicamente estabelecidos entre o servidor de jogos e os usuários. Cada vLink deve ter uma largura de banda reservada de 10 Mbps.
- Os vLinks devem ser aprovisionados somente durante o período em que o usuário estiver jogando.

### 3.4.2. Gerenciamento de VIs

Uma infraestrutura virtual possui um ciclo de vida que define: especificação, alocação, instanciação, e desalocação [AKV10]. Na seção anterior comentamos sobre o processo de especificação e tradução dos requisitos de usuários em definições de máquinas virtuais e canais de comunicação virtuais. Nesta seção, discutiremos as demais etapas envolvidas no gerenciamento de VIs. Como trata-se de um conceito recente, diversas alternativas de gerenciamento são proposições e ferramentas em desenvolvimento para

gerenciar cenários específicos. Aproveitamos para ressaltar a existência de diversos pontos que ainda estão abertos no gerenciamento de VIs, e que podem ser alvos de futuras pesquisas.

Infraestruturas virtuais são objetos simples, mas que pode ser especificados de forma complexa. O mecanismo de gerenciamento explorado pelos provedores de VI deve respeitar os aspectos elásticos e dinâmicos, introduzidos pela virtualização. Novos recursos podem ser solicitados durante a execução, ou até mesmo uma aplicação pode solicitar o aumento da capacidade de memória de uma vNode, ou da largura de banda de um vLink. O provedor de serviços, usualmente é o proprietário dos equipamentos e tem autonomia para realizar o provisionamento de uma forma completamente abstrata, sem o conhecimento do usuário. Em contrapartida, como se trata de uma reserva baseada em uma especificação pré-definida, os requisitos especificados pelo usuário durante o estabelecimento do SLA, devem ser respeitados. Enfim, o gerenciamento deve estar apto a coordenar os recursos dinamicamente, considerando o modelo econômico utilizado para as reservas em Nuvens Computacionais.



**Figura 3.10: Um usuário solicitando uma VI para executar sua aplicação. A VI deve ser instanciada sobre um conjunto de recursos virtualizados, que estão geograficamente distribuídos..**

A Figura 3.10 descreve um cenário onde um usuário deseja compor uma VI para executar sua aplicação. Utilizaremos esta figura como base para a discussão do ciclo de vida e gerenciamento de VIs. O gerenciamento e o provisionamento de uma VI é

realizado por um framework de gerenciamento, localizado acima do substrato físico representado na parte inferior da figura. Esse framework pode ser centralizado [HIP] [CAR] ou distribuído [SAI], e sua principal funcionalidade é interagir com o hardware e o software que representam os recursos virtualizados. O framework possui conhecimento sobre a composição da topologia física, sua capacidade e funcionalidade. Desta forma, pode realizar a alocação das requisições dos usuários seguindo diferentes objetivos, como diminuição da sobrecarga do substrato, economia de energia, aumento da qualidade do serviço, ou até mesmo guiado por uma combinação de objetivos [KSGV11].

O gerenciamento dos recursos virtuais, bem como sua configuração e instanciação sobre substratos distribuídos, tem sido alvo de diversas pesquisas e soluções comerciais. A instanciação de recursos virtuais em Grades Computacionais foi o foco de soluções como VINI [BFH<sup>+</sup>06], Trellis [BMM<sup>+</sup>08], e ShadowNet [XC09]. Atualmente, implementações comerciais como Amazon's Elastic Compute Cloud (EC2), Enomaly's Elastic Computing Platform (ECP) e 3Tera's AppLogic, permitem a reserva de máquinas virtuais para computação e armazenamento de dados. O gerenciamento de VIs diferencia-se dessas iniciativas pela existência e necessidade de manipular os recursos virtuais de comunicação, e não somente as máquinas virtuais. Este tem sido o foco de projetos e soluções comerciais recentes, como GEYSERS [GEY], SAIL [SAI], Lyatiss CloudWeaver, e Amazon Virtual Private Cloud.

### 3.5. Considerações finais

---

Revisando os avanços das tecnologias de virtualização, de Nuvens Computacionais e de Nuvens de Comunicação chegamos a definição do conceito de Infraestruturas Virtuais. Percorrendo este caminho, observamos que estes conceitos estão alterando a forma como utilizamos os recursos disponíveis na Internet. A reserva e o provisionamento de recursos sob demanda tornou-se uma realidade, e atualmente podemos compartilhar os recursos físicos de computação, armazenamento e comunicação, através de alocações temporárias, tarifadas de acordo com a utilização dos recursos.

Neste curso, discutimos que VIs são entidades que carregam informações complexas. Uma especificação pode abordar diversos aspectos como: i) as capacidades de computação, comunicação, armazenamento e roteamento; ii) a topologia interna; iii) as configurações e funcionalidades dos recursos; iv) aspectos temporais e dinâmicos; e v) perspectivas econômicas e de segurança. Desta forma, observamos que o gerenciamento eficiente deve considerar todas essas informações de forma combinada. Embora os provedores de serviço detenham o total controle sobre os recursos físicos, os requisitos e expectativas dos usuários também devem ser consideradas parte do problema de provisionamento.

Por fim, revisando algumas das propostas e ferramentas para gerenciamento de Nuvens Computacionais, Nuvens de Comunicação e de Infraestruturas Virtuais percebemos que existem pontos em aberto, sendo atualmente foco de diversos projetos.

### 3.6. Bibliografia

---

- [4WA] The FP7 4WARD project.
- [AB10] Jean Arnaud and Sara Bouchenak. Adaptive Internet services through performance and availability control. In *Proceedings of the 2010 ACM Symposium on Applied Computing, SAC '10*, pages 444–451, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [ABKM01] David Andersen, Hari Balakrishnan, Frans Kaashoek, and Robert Morris. Resilient overlay networks. In *SOSP '01: Proceedings of the eighteenth ACM symposium on Operating systems principles*, pages 131–145, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [AKV10] Fabienne Anhalt, Guilherme Koslovski, and Pascale Vicat-Blanc Primet. Specifying and provisioning Virtual Infrastructures with HIPerNET. *ACM International Journal of Network Management (IJNM) - special issue on Network Virtualization and its Management*, 2010.
- [AM05] L. Andersson and T. Madsen. Provider Provisioned Virtual Private Network (VPN) Terminology (RFC4026), 2005.
- [ARSS06] Artur Andrzejak, Alexander Reinefeld, Florian Schintke, and Thorsten Schütt. On Adaptability in Grid Systems. In V. Getov, D. Laforenza, and A. Reinefeld, editors, *Proceedings of Dagstuhl Seminar 04451: Future Generation Grids*, Springer CoreGRID Series. Springer, November 1–5 2006.
- [BA07] D. Benhaddou and W. Alanqar. Layer 1 Virtual Private Networks in Multidomain Next-Generation Networks. *Communications Magazine, IEEE*, 45(4):52–58, 2007.
- [BDF<sup>+</sup>03] Paul Barham, Boris Dragovic, Keir Fraser, Steven Hand, Tim Harris, Alex Ho, Rolf Neugebauer, Ian Pratt, and Andrew Warfield. Xen and the art of virtualization. In *SOSP '03: Proceedings of the nineteenth ACM symposium on Operating systems principles*, pages 164–177, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [Ber03] L. Berger. Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) - Signaling Functional Description (RFC3471), 2003.
- [BFH<sup>+</sup>06] Andy Bavier, Nick Feamster, Mark Huang, Larry Peterson, and Jennifer Rexford. In VINI veritas: realistic and controlled network experimentation. In *SIGCOMM '06: Proceedings of the 2006 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pages 3–14. ACM, 2006.

- [BMM<sup>+</sup>08] Sapan Bhatia, Murtaza Motiwala, Wolfgang Muehlbauer, Vytas Valancius, Andy Bayer, Nick Feamster, Larry Peterson, and Jennifer Rexford. Hosting Virtual Networks on Commodity Hardware. Technical report, Georgia Tech Computer Science Technical Report GT-CS-07-10, Jan 2008.
- [BSL<sup>+</sup>99] E. Bell, A. Smith, P. Langille, A. Rijhsinghani, and K. McCloghrie. Definitions of Managed Objects for Bridges with Traffic Classes, Multicast Filtering and Virtual LAN Extensions (RFC2674), 1999.
- [BTMFA09] Mukarram Bin Tariq, Ahmed Mansy, Nick Feamster, and Mostafa Ammar. Characterizing VLAN-induced sharing in a campus network. In *Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement conference*, IMC '09, pages 116–121, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [Buy09] Rajkumar Buyya. Market-Oriented Cloud Computing: Vision, Hype, and Reality of Delivering Computing as the 5th Utility. *Cluster Computing and the Grid, IEEE International Symposium on*, 0:1, 2009.
- [BWHH99] M. Baugher, B. Weis, T. Hardjono, and H. Harney. BGP/MPLS VPNs (RFC2547), 1999.
- [CAR] CARRIOCAS project: Calcul Réparti sur Réseau Internet Optique à Capacité Surmultipliée.
- [CCD<sup>+</sup>05] Franck Cappello, Eddy Caron, Michel Daydé, Frédéric Desprez, Yvon Jégou, Pascale Primet, Emmanuel Jeannot, Stéphane Lanteri, Julien Leduc, Noredine Melab, Guillaume Mornet, Raymond Namyst, Benjamin Quetier, and Olivier Richard. Grid'5000: a large scale and highly reconfigurable grid experimental testbed. In *Grid Computing, 2005. The 6th IEEE/ACM International Workshop on*, pages 8 pp., 2005.
- [CDMK<sup>+</sup>99] Andrew T. Campbell, Herman G. De Meer, Michael E. Kounavis, Kazuho Miki, John B. Vicente, and Daniel Villela. A survey of programmable networks. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 29(2):7–23, 1999.
- [CJ09] Jorge Carapinha and Javier Jiménez. Network virtualization: a view from the bottom. In *Proceedings of the 1st ACM workshop on Virtualized infrastructure systems and architectures*, VISA '09, pages 73–80, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [CM05] M. Carugi and D. McDysan. Service Requirements for Layer 3 - Provider Provisioned Virtual Private Networks (PPVPNs) (RFC4031), 2005.

- [DMT09] DMTF. DMTF white paper DSP2017: Open Virtualization Format Specification (OVF), 2009.
- [Eri94] Hans Eriksson. MBONE: the multicast backbone. *Commun. ACM*, 37(8):54–60, 1994.
- [FK97] Ian Foster and Carl Kesselman. Globus: A Metacomputing Infrastructure Toolkit. *The International Journal of Supercomputer Applications and High Performance Computing*, 11(2):115–128, Summer 1997.
- [Fos01] Ian Foster. The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations. In Rizos Sakellariou, John Gurd, Len Freeman, and John Keane, editors, *Euro-Par 2001 Parallel Processing*, volume 2150 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 1–4. Springer Berlin / Heidelberg, 2001.
- [Fos05] Ian T. Foster. Globus Toolkit Version 4: Software for Service-Oriented Systems. In Hai Jin, Daniel A. Reed, and Wenbin Jiang, editors, *NPC*, volume 3779 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 2–13. Springer, 2005.
- [FRP<sup>+</sup>08] D. Fedyk, Y. Rekhter, D. Papadimitriou, R. Rabbat, and L. Berger. Layer 1 VPN Basic Mode (RFC5251), 2008.
- [GCGV06] Diwaker Gupta, Ludmila Cherkasova, Rob Gardner, and Amin Vahdat. Enforcing performance isolation across virtual machines in Xen. In *Proceedings of the ACM/IFIP/USENIX 2006 International Conference on Middleware*, Middleware '06, pages 342–362, New York, NY, USA, 2006. Springer-Verlag New York, Inc.
- [GEN] Exploring Networks of the Future project (GENI).
- [GERL<sup>+</sup>10] Joan A. Garcia-Espin, Jordi Ferrer Riera, Ester Lopez, Sergi Figuerola, Pasquale Donadio, Giorgio Buffa, Shuping Peng, Eduard Escalona, Sebastien Soudan, Fabienne Anhalt, Philip Robinson, Alexandru-Florian Antonescu, Anna Tzanakaki, M. Anastasopoulos, Alejandro Tovar, Javier Jiménez, Xiaomin Chen, Canh Ngo, Mattijs Ghijsen, Yuri Demchemko, Giada Landi, Lukasz Lopatowski, Jakub Gutkowski, and Bartosz Belter. GEYSERS Deliverable D3.1: Functional Description of the Logical Infrastructure Composition Layer (LICL), 2010.
- [GEY] Generalized Architecture for Dynamic Infrastructure Services (FP7 - GEYSERS).
- [GEY11] GEYSERS. White paper: GEYSERS, the Revolution of Infrastructure Provisioning, 2011.

- [Han06] M. Handley. Why the Internet only just works. *BT Technology Journal*, 24:119–129, July 2006.
- [HIP] HIPCAL project.
- [HPV<sup>+</sup>99] K. Hamzeh, G. Pall, W. Verthein, J. Taarud, W. Little, and G. Zorn. Point-to-Point Tunneling Protocol (PPTP) (RFC2637), 1999.
- [Jac05] Dean Jacobs. Enterprise Software as Service. *Queue*, 3(6):36–42, 2005.
- [KF98] Carl Kesselman and Ian Foster. *The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure*. Morgan Kaufmann Publishers, November 1998.
- [KR10] Eric Keller and Jennifer Rexford. The "Platform as a Service" Model for Networking. In *USENIX, Internet Network Management Workshop / Workshop on Research on Enterprise Networking (INM/WREN)*, 2010.
- [KS05] S. Kent and K. Seo. Security Architecture for the Internet Protocol (RFC4301), 2005.
- [KSGV11] Guilherme Koslovski, Sebastien Soudan, Paulo Gonçalves, and Pascale Vicat-Blanc. Locating Virtual Infrastructures: Users and InP Perspectives. In *12th IEEE/IFIP International Symposium on Integrated Network Management - Special Track on Management of Cloud Services and Infrastructures (IM 2011 - STMCSI)*, Dublin, Ireland, May 2011. IEEE.
- [KTHMVBP09] Guilherme Koslovski, Tram Truong Huu, Johan Montagnat, and Pascale Vicat-Blanc Primet. Executing distributed applications on virtualized infrastructures specified with the VXDL language and managed by the HIPerNET framework. In *First International Conference on Cloud Computing (CLOUDCOMP 2009)*, Munich, Germany, October 2009.
- [KVBPC08] Guilherme Koslovski, Pascale Vicat-Blanc Primet, and Andrea Schwertner Charão. VXDL: Virtual Resources and Interconnection Networks Description Language. In *The Second International Conference on Networks for Grid Applications (GridNets 2008)*, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, Beijing, China, Oct. 2008. Springer Berlin Heidelberg.
- [KWZ01] Balachander Krishnamurthy, Craig Wills, and Yin Zhang. On the use and performance of content distribution networks. In *IMW '01: Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement*, pages 169–182, New York, NY, USA, 2001. ACM.



- [LVBP05] J. Laganier and P. Vicat-Blanc Primet. HIPerNet: A Decentralized Security Infrastructure for Large Scale Grid Environments. In *GRID '05: Proceedings of the 6th IEEE/ACM International Workshop on Grid Computing*, pages 140–147, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- [Lya11] Lyatiss. White paper: Orchestrating the Cloud: Integrating Server, Networking and Storage Virtualization to Maximize the Performance and Elasticity of a Cloud-Based Infrastructure, 2011.
- [MAB<sup>+</sup>08] Nick McKeown, Tom Anderson, Hari Balakrishnan, Guru Parulkar, Larry Peterson, Jennifer Rexford, Scott Shenker, and Jonathan Turner. OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 38(2):69–74, 2008.
- [MG09] Peter Mell and Tim Grance. The NIST Definition of Cloud Computing, 2009.
- [Mic09] Microsoft. White paper: Application Virtualization Cost Reduction Study, 2009.
- [NB98] K. Nichols, S. Blake, F. Baker, and D. Black. Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers (RFC2474), 1998.
- [NKB<sup>+</sup>08] Norbert Niebert, Ibtissam Khayat, Stephan Baucke, Ralf Keller, René Rembarz, and Joachim Sachs. Network Virtualization: A Viable Path Towards the Future Internet. *Wireless Personal Communications*, 45(4):511–520, June 2008.
- [OCC] Open Cloud Computing Interface Working Group (OCCI-WG).
- [PG73] Gerald J. Popek and Robert P. Goldberg. Formal requirements for virtualizable third generation architectures. In *SOSP '73: Proceedings of the fourth ACM symposium on Operating system principles*, page 121, New York, NY, USA, 1973. ACM.
- [RBL<sup>+</sup>09] Benny Rochwerger, David Breitgand, Eliezer Levy, Alex Galis, Kenneth Nagin, Ignacio M. Llorente, Ruben Montero, Yaron Wolfsthal, Erik Elmroth, Juan Caceres, Muli Ben-Yehuda, Wolfgang Emmerich, and Fermin Galan. The RESERVOIR Model and Architecture for Open Federated Cloud Computing. *IBM Journal of Research and Development*, 53(4), 2009.
- [RG05] Mendel Rosenblum and Tal Garfinkel. Virtual Machine Monitors: Current Technology and Future Trends. *Computer*, 38(5):39–47, 2005.

- [RJKG11] Bhaskar Rimal, Admela Jukan, Dimitrios Katsaros, and Yves Goelven. Architectural Requirements for Cloud Computing Systems: An Enterprise Cloud Approach. *Journal of Grid Computing*, 9:3–26, 2011. 10.1007/s10723-010-9171-y.
- [RM10] Jothy Rosenberg and Arthur Mateos. *The Cloud at Your Service*. Manning Publications Co., Greenwich, CT, USA, 1st edition, 2010.
- [RR06] E. Rosen and Y. Rekhter. BGP/MPLS IP Virtual Private Networks (VPNs) (RFC4364), 2006.
- [RSp] RSpec Reference - protogeni.
- [SAI] Scalable and Adaptive Internet Solutions project (FP7 SAIL).
- [SDG11] Daniel Schlosser, Michael Duelli, and Sebastian Goll. Performance Comparison of Hardware Virtualization Platforms. In *Proceedings of the IFIP/TC6 NETWORKING 2011*. IFIP, May 2011.
- [SSBK04] Lakshminarayanan Subramanian, Ion Stoica, Hari Balakrishnan, and Randy H. Katz. OverQos: an overlay based architecture for enhancing internet QoS. In *NSDI'04: Proceedings of the 1st conference on Symposium on Networked Systems Design and Implementation*, pages 6–6, Berkeley, CA, USA, 2004. USENIX Association.
- [SVL01] J. Sugerman, G. Venkitachalam, and B-H. Lim. Virtualizing I/O Devices on VMware Workstation's Hosted Virtual Machine Monitor. In *Proceedings of 2001 Usenix Annual Technical Conference*, pages 1–14. Usenix Assoc., 2001.
- [Tak07] T. Takeda. Framework and Requirements for Layer 1 Virtual Private Networks (RFC4847), 2007.
- [THKA<sup>+</sup>10] Tram Truong Huu, Guilherme Koslovski, Fabienne Anhalt, Pascale Vicat-Blanc Primet, and Johan Montagnat. Joint elastic cloud and virtual network framework for application performance optimization and cost reduction. *Journal of Grid Computing (JoGC)*, 2010.
- [TVR<sup>+</sup>99] W. Townsley, A. Valencia, A. Rubens, G. Pall, G. Zorn, and B. Palter. Layer Two Tunneling Protocol (L2TP) (RFC2661), 1999.
- [TW02] David L. Tennenhouse and David J. Wetherall. Towards an Active Network Architecture. In *DANCE '02: Proceedings of the 2002 DARPA Active Networks Conference and Exposition*, page 2, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society.
- [VBPAK09] Pascale Vicat-Blanc Primet, Fabienne Anhalt, and Guilherme Koslovski. Exploring the virtual infrastructure service concept in

- Grid'5000. In *20th ITC Specialist Seminar on Network Virtualization*, Hoi An, Vietnam, May 2009.
- [VLK98] A. Valencia, M. Littlewood, and T. Kolar. Cisco Layer Two Forwarding (Protocol) L2F (RFC2341), 1998.
- [VMW09] VMWare. White paper: The Business Value of Virtualization, 2009.
- [VMW10] VMWare. White paper: Understanding Full Virtualization, Paravirtualization, and Hardware Assist, 2010.
- [Wal02] Carl A. Waldspurger. Memory Resource Management in VMware ESX Server. In *Proceedings of OSDI '02*, 2002.
- [WN10] Guohui Wang and T. S. Eugene Ng. The impact of virtualization on network performance of amazon EC2 data center. In *Proceedings of the 29th conference on Information communications*, INFOCOM'10, pages 1163–1171, Piscataway, NJ, USA, 2010. IEEE Press.
- [WSG02] A. Whitaker, M. Shaw, and S. Gribble. Denali: Lightweight virtual machines for distributed and networked applications, 2002.
- [XC09] Kobus Van der Merwe Xu Chen, Z. Morley Mao. ShadowNet: A Platform for Rapid and Safe Network Evolution. In *Proceedings of USENIX Annual Technical Conference (USENIX'09)*, 2009.
- [ZCB10] Qi Zhang, Lu Cheng, and Raouf Boutaba. Cloud computing: state-of-the-art and research challenges. *Journal of Internet Services and Applications*, 1(1):7–18, May 2010.