

Gerenciamento Flexível de Infraestrutura de Acesso Público à Internet com NFV

Alexandre Heideker, Carlos Kamienski

Universidade Federal do ABC (UFABC)
{alexandre.heideker, cak}@ufabc.edu.br

Abstract. *The concepts of Smart Cities, Internet of Things (IoT), smartphones and other pervasive computing technologies are reality, creating computing and telecommunications infrastructure demands, requiring flexibility, quality of service and reducing financial and environmental cost. Technologies like Network Functions Virtualization (NFV), Cloud Computing and Software-Defined Network (SDN) appear as a promise to address these demands. This work uses NFV to solve the problem of dynamic and elastic supply of public Internet access in big cities. The results show significant levels of performance and flexibility, and performance metric comparison between KVM, XEN and LXC containers in NFV.*

Resumo. *Os conceitos de Cidades Inteligentes, Internet das Coisas (IoT), smartphones e outras tecnologias de computação pervasiva, já são realidade, gerando demandas computacionais e de infraestrutura de telecomunicações, exigindo flexibilidade, qualidade de serviço e redução de custo financeiro e ambiental. Tecnologias como Virtualização de Funções de Rede (NFV), Computação em Nuvem e Redes Definidas por Software (SDN) figuram como promessa para solucionar essas demandas. Este trabalho utiliza NFV para solucionar o problema de fornecimento dinâmico e elástico de acesso público à internet nas grandes cidades. Os resultados obtidos demonstram níveis significativos de desempenho e flexibilidade, além de métricas de comparação de desempenho entre KVM, XEN e containers LXC em NFV.*

1 Introdução

O processo de urbanização e a adoção de tecnologias altamente conectadas, como *smartphones*, *tablets*, Internet das Coisas (IoT), casas inteligentes, redes veiculares, entre outras, desencadearam novos desafios, tanto no que concerne ao processamento desses dados como no transporte destes por intermédio das redes de computadores. Este arcabouço de problemas e soluções deu origem à área da computação urbana, que trata o desafio das cidades inteligentes com uma abordagem computacional [Zheng et al. 2014].

Entre as abordagens utilizadas para tratar o problema computacional das cidades inteligentes, destaca-se a computação em nuvem, que permite a alocação de recursos sob demanda, reduzindo investimento e apresentando-se como solução ambientalmente responsável. Outro paradigma oriundo deste cenário é o *Fog Computing*, onde a união de nuvens públicas e privadas, computação embarcada, IoT entre outros elementos da computação urbana formam um grande sistema [Stojmenovic and Wen 2014].

O tratamento do desafio de transporte dos dados deste ambiente também exige soluções inovadoras, baratas e ambientalmente corretas – mobilidade e elasticidade são premissas básicas para soluções de telecomunicações neste ambiente. A virtualização de

redes, utilizando tecnologias como SDN (*Software-Defined Networking*) [McKeown et al. 2008] e NFV (*Network Functions Virtualization*) [ETSI et al. 2012] são grandes promessas para a solução dessas demandas.

Entre os muitos desafios apresentados por este novo ambiente de convivência do cidadão, um dos mais presentes em seu cotidiano é o acesso à internet em locais públicos, política que já vem sendo adotada por diversas cidades ao redor do mundo utilizando a tecnologia Wi-Fi. A partir de 2014, a Prefeitura de São Paulo deu início ao projeto WiFi Livre SP¹, com o objetivo de fornecer acesso público à internet em 120 praças da cidade [Ratusznei et al. 2014], utilizando tecnologias e topologias tradicionais de rede. Além de questões socioculturais apresentadas por esta iniciativa, a qualidade do serviço oferecido também representa um grande desafio neste projeto.

Este trabalho propõe uma solução para gerenciamento de infraestrutura de acesso público à Internet através de WiFi que usa funções de rede virtualizadas (VNF – *Virtualized Network Function*) como alternativa aos sistemas tradicionais baseados em plataformas específicas de software e hardware, abordando três das nove tendências tecnológicas para 2016 apontadas pela IEEE Computer Society². Particularmente, é apresentada uma solução para o gerenciamento de NAT (*Network Address Translator*) em um ambiente com praças digitais onde milhares de usuários usam a Internet todos os dias. As funções de rede virtualizadas são criadas e destruídas, de acordo com a demanda, ou seja, é realizado um gerenciamento dinâmico de elasticidade para NFV, semelhante ao que tradicionalmente ocorre em ambientes de nuvem computacional.

Os resultados obtidos corroboram as vantagens preconizadas pelo ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), no incentivo à adoção da tecnologia NFV, demonstrando que a divisão das tarefas realizadas por um *appliance* em múltiplas instâncias virtualizadas produzem resultados comparáveis às soluções tradicionais dentro dos intervalos de confiança obtidos nos experimentos. Além de apresentar esta avaliação, a mesma é realizada utilizando as técnicas de virtualização KVM, XEN e containers LXC, demonstrando sua influência no desempenho geral da solução e identificando os prós e contras na escolha dessas tecnologias.

A seção 2 apresenta os trabalhos correlatos à tecnologia NFV e Cidades Inteligentes. Na seção 3, tem-se os conceitos de NFV e as técnicas de virtualização utilizadas. A seção 4 traz a metodologia utilizada e os experimentos preliminares para definição de parâmetros e métricas. Na seção 5 são apresentados os resultados obtidos pelos experimentos e, na seção 6, é realizada a discussão sobre os resultados obtidos e lições aprendidas.

2 Trabalhos Relacionados

O fornecimento de internet em áreas públicas é explorado em [Heideker and Kamienski 2015], no qual o fenômeno *flash crowd* é explorado utilizando NFV para prover recursos de infraestrutura em demandas sazonais, utilizando o sistema operacional de nuvem OpenStack³ para fornecer as funções de rede virtualizadas. Grande parte dos trabalhos relacionados à Computação Urbana tratam da informação contida neste sistema ou da infraestrutura de acesso individual, como em [Roth et al. 2010], onde

¹ <http://wifilivre.sp.gov.br>. Acesso em: 11/01/2016.

² <http://www.prnewswire.com/news-releases/ieee-computer-society-predicts-top-9-technology-trends-for-2016-300193210.html>. Acesso em: 18/02/2016.

³ <http://www.openstack.org>. Acesso em: 05/01/2016.

tecnologias de acesso como WiMAX e redes 4G são discutidas, bem como o desafio do posicionamento e distribuição de antenas para obter a maior cobertura por km² possível. Relacionando, também, à ideia das casas inteligentes e acesso à serviços digitais, a proposta de [Bronstein 2014] trata o problema do fornecimento de internet, entretenimento multimídia, telefonia e outros recursos sob o ponto de vista da tecnologia NFV, transformando essas demandas em VNFs que podem ser alocadas de acordo com a necessidade e/ou preferência da residência.

Com o objetivo de propor uma implementação de plataforma para prover NFV, em [Soares et al. 2014] os autores propõem a criação de uma plataforma específica para NFV utilizando outra tecnologia em franca ascensão: Redes Definidas por Software (SDN - *Software Defined Network*). Essa plataforma, batizada de Cloud4NFV utiliza a ideia central da tecnologia SDN de desacoplar o plano de dados do plano de controle da infraestrutura de rede [Open Networking Foundation 2012], direcionando os fluxos de dados para a VNF responsável pela sua manipulação. Com o mesmo objetivo, em [Gember-Jacobson et al. 2015], os autores propõem a criação de um repositório de funções de rede chamado OpenNF, onde os fluxos de dados externos são manipulados e direcionados utilizando também os conceitos de SDN. O enfoque do OpenNF é a preservação do estado, ou seja, redução de retrabalho, reenvio ou descarte de pacotes durante o processo de criação, manipulação ou falha de uma VNF, deixando em segundo plano o conceito de virtualização. Além desses esforços, destaca-se os projetos ZOOM [Demchenko et al. [S.d.]], OpenMANO⁴ e UNIFY [Császár et al. 2013].

Outra abordagem voltada à performance da tecnologia é explorada em [Martins et al. 2014] com o ClickOS, onde o tempo de criação de máquinas virtuais, da ordem de poucos milissegundos, e a melhora no tempo de manipulação dos pacotes é tratada com uma versão minimalista do sistema operacional, além de ajustes no hipervisor para obter o máximo desempenho possível.

O trabalho de [Bari et al. 2015], por sua vez, explora a orquestração de NFV, apresentando resultados analíticos que apontam para uma redução de até 4 vezes no custo de operação e investimento (OPEX) em relação à abordagem tradicional, formalizando a solução como um problema de programação linear.

Este trabalho diferencia-se dos demais por implementar um mecanismo de elasticidade utilizando NFV, tratando o problema de fornecimento de infraestrutura dinâmica, utilizando dados de um cenário real para avaliar o desempenho da tecnologia NFV e seu relacionamento com três tecnologias distintas de virtualização, servindo desta forma como prova de conceito para fundamentar ainda mais a tecnologia NFV.

3 Conceitos Básicos

3.1 Virtualização de Redes e NFV

O modelo de referência OSI [Sousa et al. 2007], assim como o próprio modelo TCP/IP, têm como objetivo a criação de camadas de abstração da infraestrutura de rede necessária à comunicação. Essa abstração mostrou-se eficaz e promoveu o crescimento das redes de computadores. No cenário atual, é comum que a informação, entre sua origem e seu destino, atravesse um grande número de elementos de rede responsáveis por este trajeto. Além dos enlaces, estão envolvidos nesta tarefa os chamados

⁴ <http://www.tid.es/long-term-innovation/network-innovation/telefonica-nfv-reference-lab>. Acesso em: 13/012016.

middleboxes, entre os quais destacam-se Roteadores, NAT, VPN (*Virtual Private Network*), *Proxy*, *Firewall*, LB (*Load Balancer*), entre outros.

Segundo Patouni [Patouni et al. 2013], a virtualização de redes consiste na abstração destes recursos, simplificando a tarefa de alocação, considerando localização física e uso, além de promover a separação entre recursos físicos e lógicos.

O trajeto percorrido pela informação nas redes atuais, como foi mencionado, envolve outros elementos além dos enlaces. Estes *middleboxes*, sob o ponto de vista da virtualização de redes, são denominados Funções de Rede. Essas funções de rede são, via de regra, implementadas por equipamentos dedicados, com hardware e software proprietários, conhecidos como *appliances*. De acordo com o ETSI, além do alto custo de aquisição destes equipamentos, as tecnologias utilizadas impedem a evolução e/ou modificação destes para implementar novas ideias e tecnologias experimentais. Do ponto de vista do gerenciamento, a tarefa é por vezes realizada apenas no local ou via console, além de exigir modificações nas conexões físicas em certas circunstâncias. Finalmente, o dimensionamento destes é realizado considerando a demanda máxima, gerando desperdícios na aquisição dos equipamentos e no consumo de energia. Quando esta demanda máxima é superada, novos equipamentos devem ser adquiridos, configurados e instalados no local, gerando um tempo de solução para o problema da demanda que pode compreender algo entre horas ou até dias.

Considerando este cenário e com as novas exigências e paradigmas como a Computação em Nuvem, o ETSI propôs em 2012 o conceito de NFV e, na sequência, um conjunto de casos de uso [ETSI 2013] onde a tecnologia pode ser aplicada. A Figura 1 apresenta o conceito básico que apoia a tecnologia NFV, ou seja, a substituição de equipamentos dedicados por versões virtuais suportadas por servidores e equipamentos de rede *commodities* utilizando técnicas de virtualização.

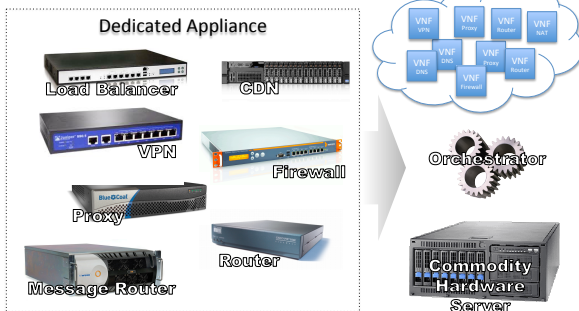


Figura 1: Conceito Básico de NFV.

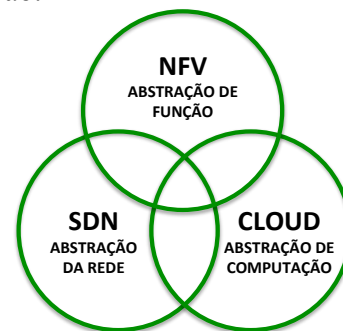


Figura 2: Relacionamento entre NFV, SDN e Computação em Nuvem.

A visão apresentada pelo ETSI mostra claramente uma relação, não dependente, entre NFV, SDN e Computação em Nuvem. Em [Mijumbi et al. 2015, Open Networking Foundation 2015], essa relação apresentada na Figura 2 mostra o benefício mútuo presente na intersecção entre NFV e SDN, promovendo a automação, isolamento e agilidade entre NFV e Computação em Nuvem na orquestração, elasticidade e provimento de recursos. A intersecção das três tecnologias permite a implementação do conceito de Infraestrutura como Serviço (IaaS) de forma ampla e eficiente.

3.2 Técnicas de Virtualização

O elemento fundamental de NFV é a técnica de virtualização e esta pode influenciar diretamente na performance e versatilidade da implementação das Funções de Rede

Virtualizadas (VNF). Entre as técnicas disponíveis, este trabalho avalia a virtualização total, a paravirtualização e os containers Linux.

Na virtualização total, é fornecido pelo sistema hospedeiro uma camada completa de abstração, onde todo o hardware é virtualizado – neste tipo de virtualização o sistema operacional(SO) hóspede não detecta que está sendo virtualizado. A Figura 3(a) apresenta a relação entre o SO hóspede, o hardware virtualizado e o SO hospedeiro.

Já a paravirtualização modifica o SO hóspede, como pode ser observado na Figura 3(b), reduzindo as camadas de abstração até o hardware, com o objetivo de melhorar a performance e o controle do SO hóspede pelo hipervisor – como há uma série de modificações que são realizadas no SO hóspede, diz-se que, neste caso, este consegue detectar que está sendo virtualizado.

O terceiro tipo de virtualização abordado neste trabalho não possui todas as características que definem uma máquina virtual. Os containers são um método de compartilhamento de máquina, onde o mesmo kernel é utilizado por vários ambientes operacionais, utilizando para isso as características de separação de espaço de nomes e diretório raiz nativas do Linux, como pode ser observado na Figura 3(c). Define-se um sistema de arquivos, partição de memória, usuários, grupos e até adaptadores de rede virtuais individuais, porém sobre o mesmo SO hospedeiro. Este tipo de “virtualização” apresenta características importantes, principalmente no acesso ao hardware que não é virtualizado e, sim, diretamente acessado. Por outro lado, questões de segurança e portabilidade são questionáveis nesta abordagem.

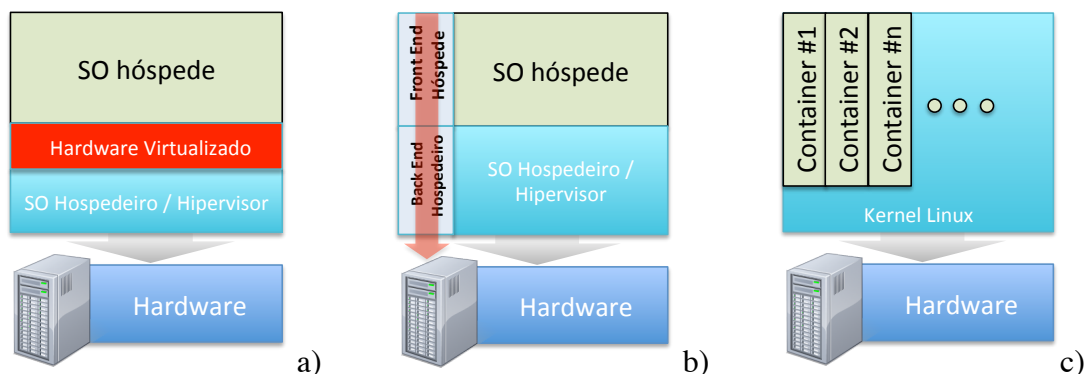


Figura 3: Virtualização Completa, Paravirtualização e Linux Containers.

Há inúmeras implementações destes diferentes métodos de virtualização e alguns virtualizadores também são capazes de utilizar tanto o método de virtualização total como a paravirtualização. Nos experimentos realizados utilizou-se o KVM para virtualização total, o XEN para a paravirtualização e o LXC para containers.

3.3 Switch Virtual – Open vSwitch

O conceito de virtualização prevê a existência de múltiplas máquinas virtuais sob uma única máquina física. Sob esta premissa, a ideia de interconexão destas múltiplas máquinas em uma rede é necessária, ou seja, uma infraestrutura de rede virtual. Além disso, a interconexão com diferentes máquinas reais e com a infraestrutura física também faz-se necessária. Dentre as muitas soluções para esta questão, o projeto Open vSwitch⁵ (OVS) mostrou-se eficaz, não apenas por prover virtualmente todas as

⁵ <http://www.openvswitch.org>. Acesso em 01/04/2015.

facilidades e funcionalidades dos switches mais modernos, como também pela possibilidade de utilizar o protocolo OpenFlow [McKeown et al. 2008] para sua operação, promovendo o uso do paradigma SDN. Alia-se a essa característica a adoção do OpenFlow por switches físicos, o que permite a interação direta entre equipamentos físicos e virtuais de forma transparente.

4 Metodologia

Os experimentos realizados consideraram a amostra do número médio de usuários conectados em 117⁶ praças da cidade de São Paulo [Ratusznei et al. 2015]. A Figura 4 apresenta a distribuição destes acessos em cada praça utilizada para produzir o tráfego necessário ao experimento, totalizando 3.813 usuários simultaneamente. O tráfego gerado por estes usuários, mostrado na Figura 5, consiste na transferência de arquivos selecionados uniformemente, com tamanhos que seguem uma distribuição Lognormal com média 5Kbytes e variância $1,65 \times 10^{-4}$.

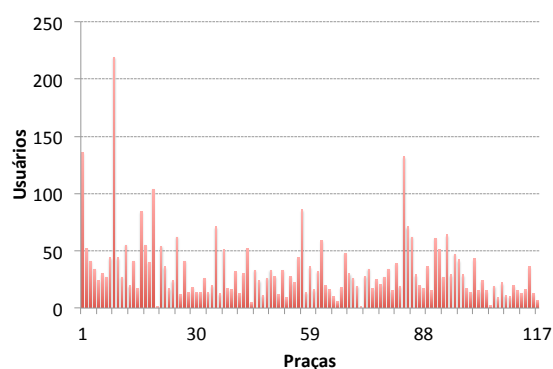


Figura 4: Distribuição de Usuários Entre as Praças.

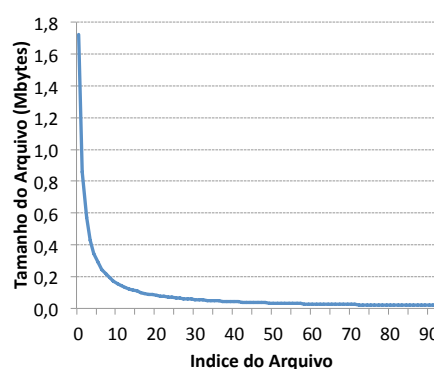


Figura 5: Distribuição de Tamanho dos Arquivos.

Na Figura 6 tem-se o esquema descritivo do experimento, no qual as Praças Digitais, doravante denominadas simplesmente Praças, são representadas com seus respectivos usuários. Em cada Praça há uma infraestrutura básica para prover os serviços de conexão sem fio (Wi-Fi) dos usuários e realizar o encaminhamento do tráfego para as instalações da empresa responsável por tratá-lo e realizar a troca de tráfego com a Internet.

Ainda na Figura 6, tem-se o controlador de elasticidade com NFV⁷. A função deste controlador é monitorar a utilização das VNFs instanciadas para efetuar a tradução dos endereços de rede (NAT), encaminhando o tráfego para aquelas com menor nível de utilização, modificando, para isso, a rota padrão (gateway) das Praças envolvidas na sobrecarga. No caso de sobrecarga do conjunto das VNFs, o controlador cria uma nova instância para dividir o tráfego. Caso o uso das instâncias esteja abaixo do limiar inferior, as instâncias com menor carga são eliminadas e suas Praças dependentes são direcionadas para as VNFs restantes.

⁶ O projeto Wi-Fi Livre SP da Prefeitura de São Paulo contempla 120 praças porém os dados de utilização estavam disponíveis em apenas 117 em agosto de 2015.

⁷ Código fonte disponível em: <https://github.com/heideker/elasticNFV.git>

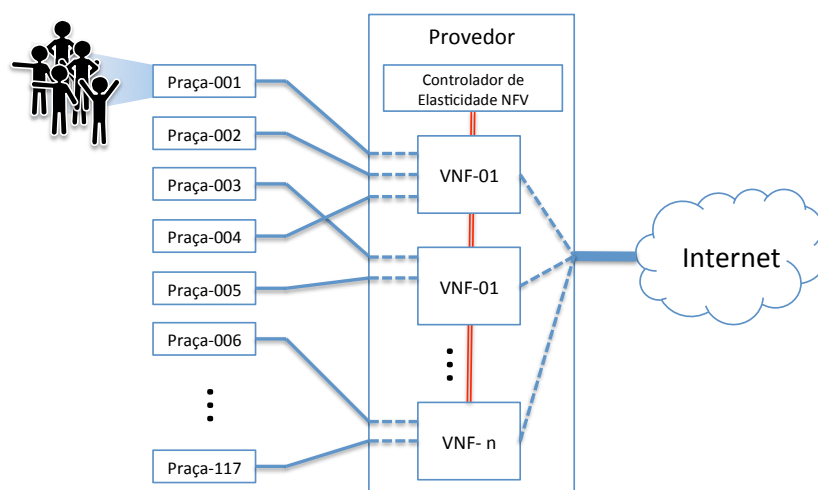


Figura 6: Esquema Descritivo do Experimento.

No início dos experimentos, há apenas uma VNF de NAT instanciada para tratar o tráfego. Como é imposto aos geradores de tráfego um crescimento no número de requisições para forçar o mecanismo de elasticidade a entrar em ação, nos primeiros instantes do experimento esta única VNF é capaz de atender a demanda do sistema. Quando o número de requisições começa a aumentar, o controlador inicia a sua atuação. A Figura 7 apresenta uma amostra da taxa de conexões ao longo do experimento submetida ao sistema.

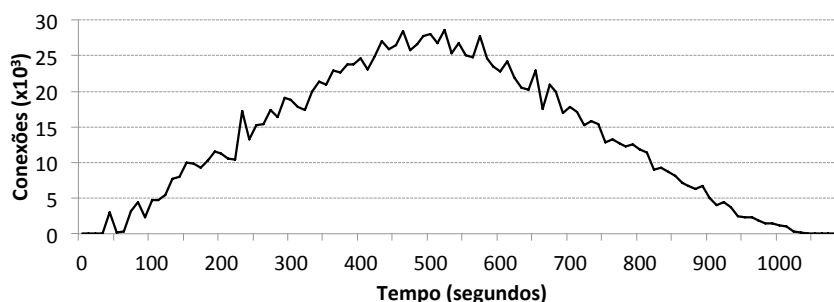


Figura 7: Taxa de Conexões ao Longo de Experimento.

O cenário proposto para o experimento e descrito na Figura 6 é traduzido no esquema lógico da Figura 8. Três servidores físicos são utilizados para produzir o tráfego, onde cada Praça é representada por um container LXC, que, por sua vez, hospeda processos que geram o tráfego equivalente ao número médio de usuários apurados na praça em questão.

Ainda na Figura 8, tem-se o servidor de NFV, que fornece VNFs utilizando uma das três tecnologias abordadas neste trabalho: KVM, XEN ou LXC. A criação das VNFs é orquestrada pelo Controlador NFV que monitora o seu estado, criando novas instâncias, modificando as rotas das Praças para melhor acomodação do tráfego ou dispensando instâncias subutilizadas, de acordo com a política de elasticidade. Finalmente, há no esquema lógico um servidor web responsável por responder ao tráfego gerado pelas Praças. A Tabela 1 mostra a especificação dos equipamentos utilizados nos experimentos.

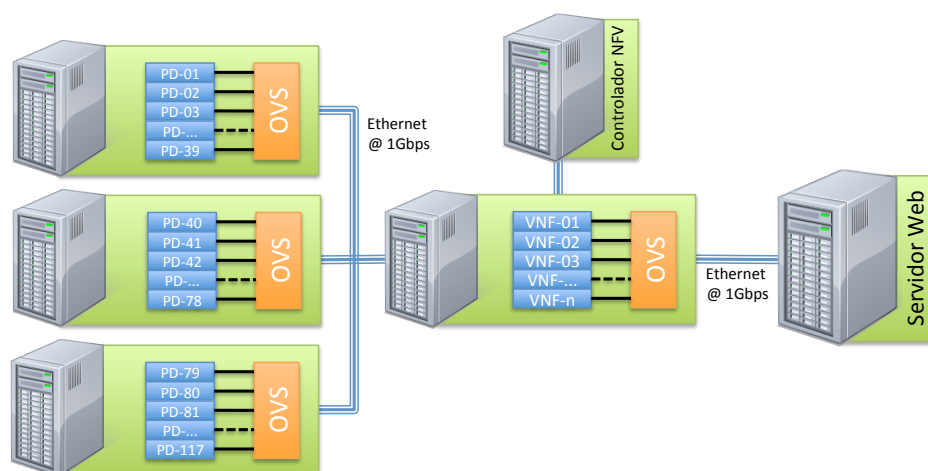


Figura 8: Esquema Lógico do Experimento.

Para realizar os experimentos foi escolhido o NAT como função de rede, por ter características adequadas ao cenário proposto. Com maior ou menor nível de complexidade, todas as funções de rede recebem pacotes, fazem algum tipo de inferência ou modificação e encaminham pacotes para a fonte ou para o destino. No caso do NAT, os pacotes são recebidos, registrados e modificados, encaminhados ao destino e, em seu retorno, novamente tratados.

Tabela 1: Especificação dos Equipamentos Utilizados nos Experimentos.

Equipamento	Características
Geradores de Tráfego (3)	Intel® Xeon® E3-1240 V2 @ 3.40GHz 4 núcleos
Servidor de VNFs (3)	Intel® Xeon® E3-1240 V2 @ 3.40GHz 4 núcleos
Controlador de NFV (1)	Intel® Xeon® E5410 @ 2.33GHz 4 núcleos
Servidor Web (1)	Intel® Xeon® E3-1240 V2 @ 3.40GHz 4 núcleos
Switch Físico (1)	48 portas Gigabit Ethernet (IEEE 802.3z 1000Mbits/s)

Para monitorar o estado da VNF, identificando seu nível de utilização, um pequeno processo é executado nesta , respondendo às requisições TCP na porta 5999, informando seu estado atual. O controlador faz o monitoramento das VNFs instanciadas em intervalos regulares de 10 segundos.

No caso da função de rede NAT, em especial na sua implementação no Linux através do IPTables, há uma estrutura de dados que limita o número de conexões simultâneas administráveis pelo NAT – a tabela *conntrack* – que, por sua vez, tem seu tamanho limitado à quantidade de memória disponível na máquina em questão. Para o tamanho das máquinas virtuais utilizadas para hospedar as VNFs foi definido, considerando o tamanho típico de uma instância utilizadas nas plataformas de computação em nuvem, com 512Mbytes de RAM. Para este tamanho de memória, o tamanho da tabela *conntrack* foi definido com 8192 posições, ou seja, quando 8192 conexões simultâneas são rastreadas pela VNF, o monitor reporta ao controlador um nível de 100% de utilização.

Nos experimentos preliminares, as métricas de CPU e de memória também foram avaliadas, porém sem resultados conclusivos. A Figura 9 apresenta a comparação

entre estas métricas, submetendo a VNF a um volume crescente de conexões. Tanto o nível de utilização de CPU como a ocupação de memória apresentaram uma variação insignificante ao longo do experimento, não demonstrando correlação direta com o nível de utilização da VNF. No caso da tabela *conntrack*, há uma relação direta com o crescimento do tráfego, mostrando-se como métrica adequada para monitoramento no caso do NAT.

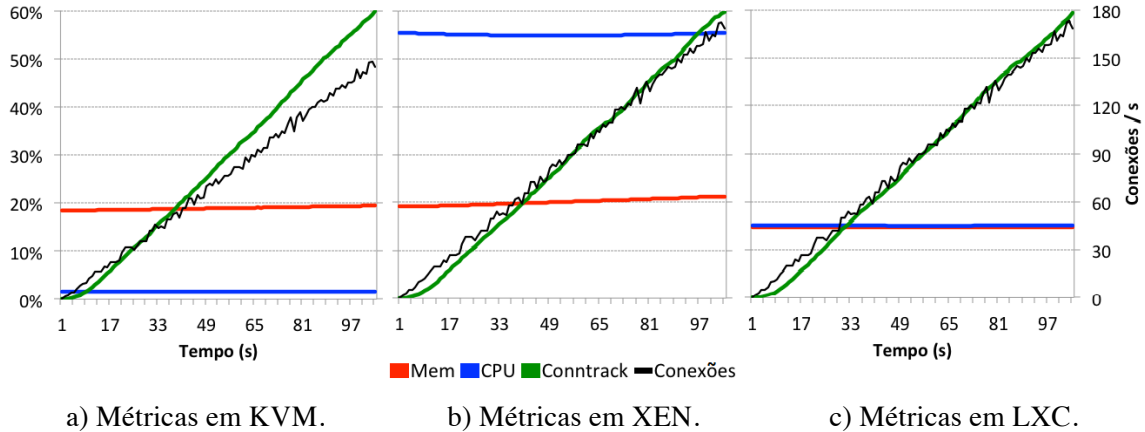


Figura 9: Comparação de Métricas de Monitoramento

5 Resultados

O primeiro experimento submete o sistema a um tráfego constante, variando o número de VNFs que atende as Praças. Foram realizados experimentos com 1, 2, 4, 8 e 16 VNFs com o objetivo de avaliar a escalabilidade em relação à tecnologia de virtualização. A Figura 10(a) apresenta o número de requisições por segundo admitidas pelo sistema. Apesar do número de conexões admitidas crescer quando o tráfego é dividido entre um maior número de VNFs, observa-se, na Figura 10(b) que há uma diferença expressiva na vazão com o uso de LXC.

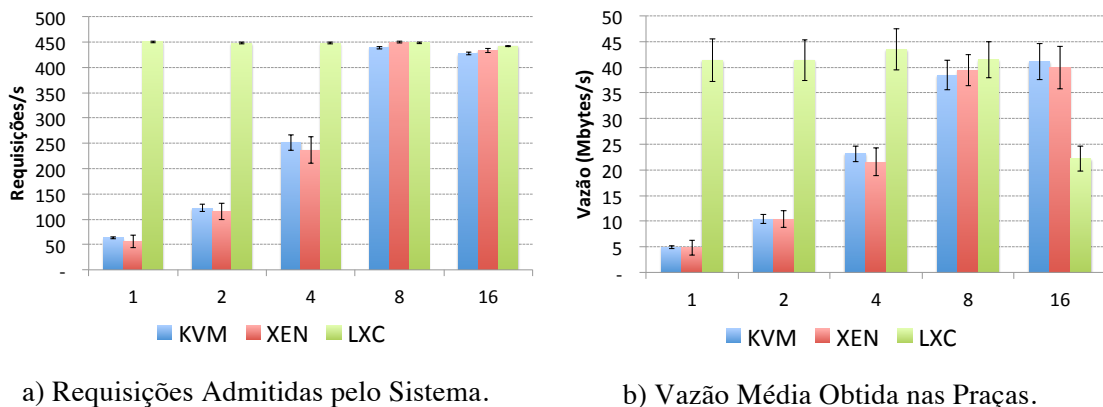
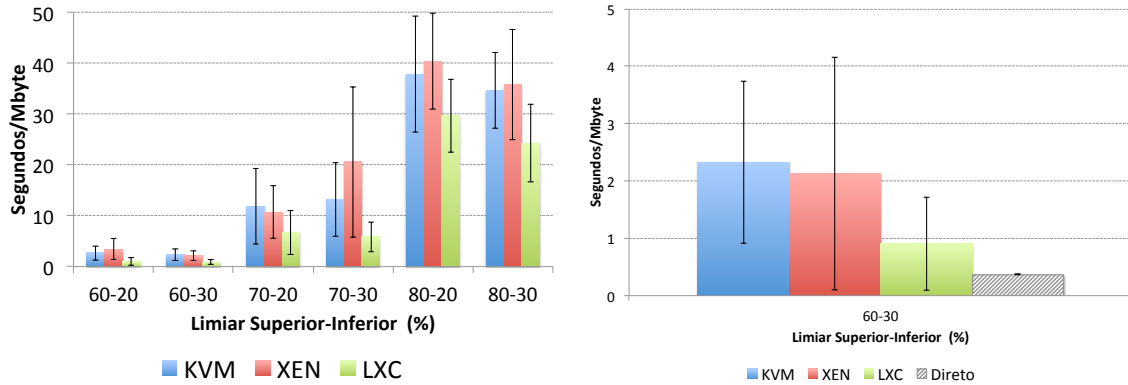


Figura 10: Escalabilidade do Serviço.

O segundo experimento considera o tráfego com crescimento constante (Figura 7), utilizando o mecanismo de elasticidade para gerenciar o uso das VNFs. A Figura 11(a) apresenta a taxa de transferência em segundos por megabyte obtida pelo sistema, utilizando diferentes limiares superiores e inferiores para o mecanismo de elasticidade. A avaliação dos resultados obtidos levou à escolha do limiar “60-30”, entre os pares experimentados, como adequado à operação do sistema. A Figura 11(b) apresenta com

maior resolução o resultado obtido por este limiar e a sua comparação com a abordagem direta (sem o uso de NFV).



a) Comparação Entre Diferentes Limiares.

b) Comparação Entre as Tecnologias.

Figura 11: Taxa de Transferência (s/MB).

Outra métrica explorada neste experimento é o *Round Trip Time* (RTT), medido entre cada Praça e o servidor Web. A Figura 12 apresenta os resultados obtidos e a comparação com a abordagem direta (sem o uso de NFV).

O tempo necessário para a criação de uma nova instância de VNF durante a operação do sistema pode influenciar o desempenho geral do sistema, haja vista que a demora na disponibilização deste novo recurso pode sobrecarregar as VNFs existentes. A Figura 13 apresenta o tempo médio de criação das VNFs durante a execução do experimento com diferentes limiares.

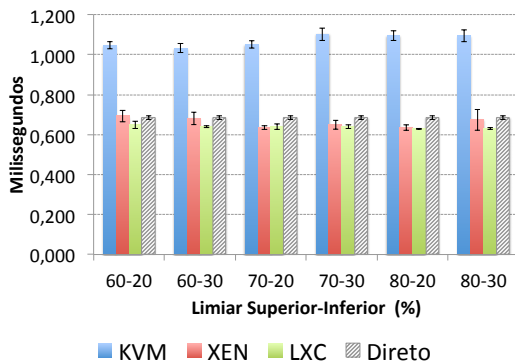


Figura 12: RTT entre Praças e Servidor Web

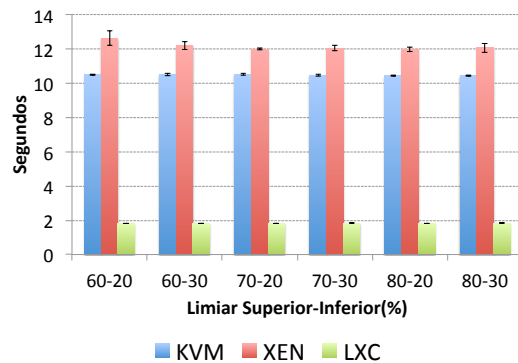


Figura 13: Tempo Médio de Criação de VNF

Outra métrica relacionada diretamente à VNF é a sua carga média, observada durante o experimento, e a influência dos diferentes limiares nesta métrica. A Figura 14 apresenta o resultado obtido para esta métrica. Também relacionado ao uso das VNFs e ao custo de operação do sistema, tem-se a ocupação média de recursos, apresentada na Figura 15. Todos os experimentos foram realizados com 30 repetições com intervalos de confiança de 99%.

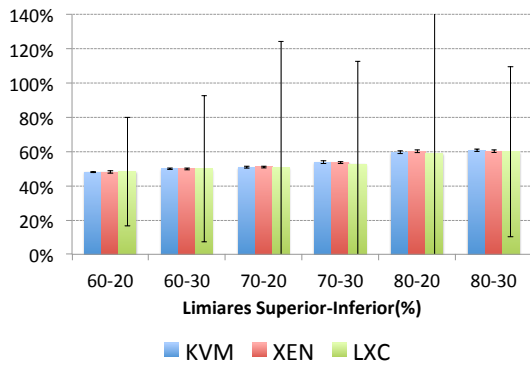


Figura 14: Carga Média das VNFs.

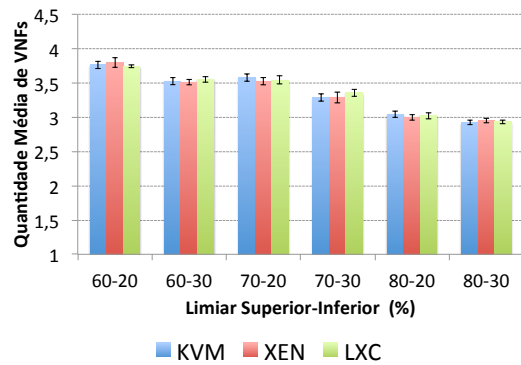


Figura 15: Ocupação Média de VNFs.

As Figuras 16 (a), (b) e (c) apresentam uma série temporal de um dos experimentos com KVM, XEN e LXC, respectivamente, considerando os limiares 60-30. Estas séries apresentam o nível de utilização de cada uma das VNFs instanciadas no decorrer do experimento, assim como a curva de tráfego à qual as VNFs estão submetidas.

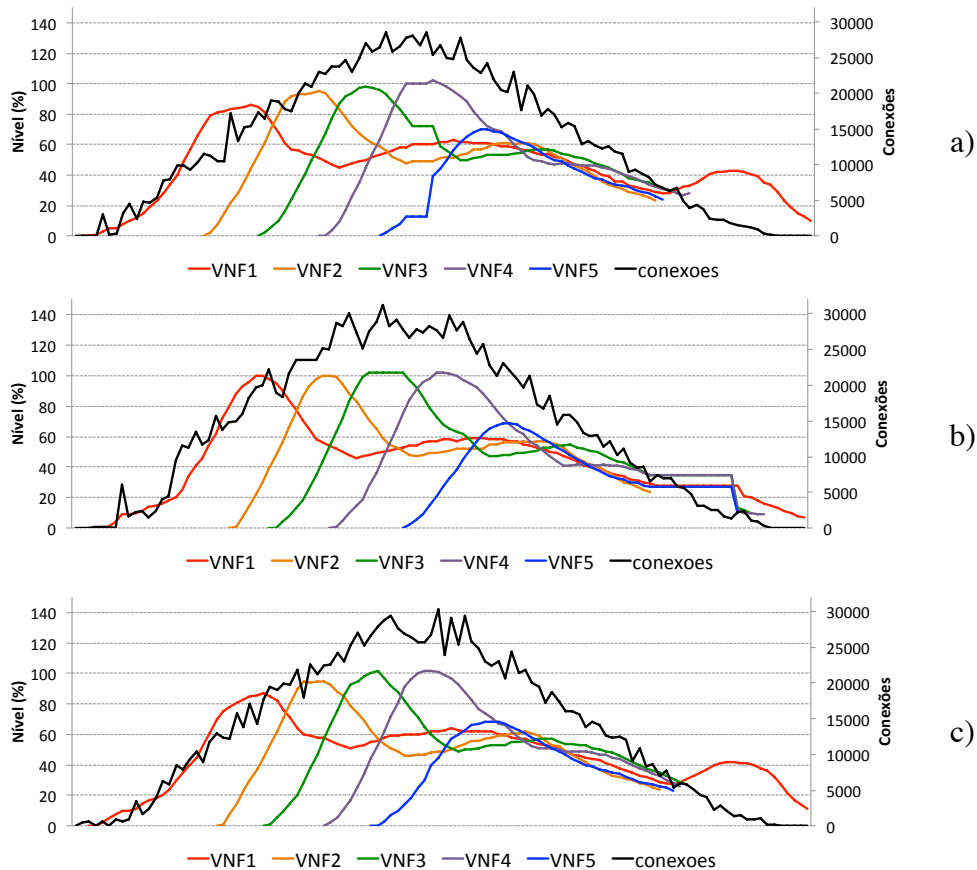


Figura 16: Amostra das Séries Temporais dos Experimentos com KVM(a), XEN(b) e LXC(c).

6 Discussão

A escalabilidade é, sem dúvida, uma das características mais desejadas em ambiente onde os recursos são virtualizados, com a possibilidade de atender diferentes demandas de forma rápida e eficiente. Apesar da tecnologia LXC apresentar um desempenho superior na maior parte das métricas avaliadas, uma característica da tecnologia de virtualização em containers apresenta um obstáculo para sua adoção – é possível observar nos resultados obtidos na Figura 10(b) uma clara redução na vazão quando muitas instâncias de LXC compartilham o mesmo kernel.

No caso específico da função de rede NAT, é possível observar que o fato do kernel da máquina hospedeira ser compartilhado por todos os containers instanciados, é prejudicial quando muitas instâncias dividem estes recursos. Neste caso, a tabela *conntrack* é única, e sua ocupação é disputada pelas diversas VNFs instanciadas – no caso do XEN e KVM, cada máquina virtual possui seu próprio kernel com seus recursos protegidos, ou seja, a soma das tabelas *conntrack* destas múltiplas VNFs é maior que a de um único hospedeiro LXC, mesmo que ele detenha todos os recursos da máquina física. Mesmo que este efeito seja marcante no caso do NAT, muitas funções de rede podem sofrer da mesma anomalia, tendo em vista que a maior parte das manipulações de pacotes ocorrem dentro do próprio kernel do sistema operacional, como *Firewall*, *Traffic shaping*, entre outros.

Já com relação aos resultados apurados no experimento dinâmico, o comportamento obtido pela arquitetura proposta é bastante satisfatório, corroborado pela sobreposição dos intervalos de confiança entre XEN, LXC e a abordagem direta, permitindo o controle da utilização dos recursos pelo ajuste nos limiares e garantindo um nível de serviço comparável à abordagem tradicional, com a vantagem da escalabilidade dinâmica e da aplicação de recursos de infraestrutura sob demanda.

Os resultados obtidos de RTT mostraram uma desvantagem do KVM em relação às tecnologias XEN e LXC, perfeitamente explicável pelo método de virtualização (virtualização total), que aplica mais camadas de abstração entre o SO hóspede e a interface física, implicando um aumento do atraso no processamento dos pacotes.

A avaliação do tempo de criação da VNF mostra uma larga vantagem do LXC, apesar das desvantagens citadas anteriormente. Vale ressaltar que, tanto no XEN, como no KVM, foi utilizada uma máquina virtual sem otimizações, com tamanho típico das máquinas utilizadas em ambientes de computação em nuvem – há trabalhos, como em [Martins et al. 2014], nos quais o foco é a otimização não apenas da máquina virtual como do hipervisor para garantir tempos de instanciação da ordem de 30 milissegundos.

Os resultados obtidos pela avaliação da utilização dos recursos apresentaram valores coerentes com o esperado e equilibrados, independentemente da tecnologia utilizada. Observa-se, na Figura 14 que os intervalos de confiança obtidos pelo experimento utilizando LXC tornaram o resultado inconclusivo, explicável pela característica mencionada do compartilhamento da tabela *conntrack* pelos múltiplos containers, não permitindo o correto monitoramento de seu estado ao longo do tempo.

Finalmente, as séries temporais obtidas apresentaram o comportamento esperado do mecanismo de elasticidade, como a criação das novas VNFs com o crescimento do tráfego, a acomodação de seus níveis com a transferência do tráfego das praças entre as instâncias disponíveis e a dispensa dos recursos ociosos durante a redução do tráfego.

7 Conclusões

O experimento proposto permitiu identificar claramente as vantagens preconizadas pelo ETSI para a tecnologia NFV. Versatilidade, alocação dinâmica de recursos e as consequentes reduções de custo são facilmente observadas neste estudo.

No que tange às tecnologias de virtualização, foi possível observar as vantagens que são apresentadas pela tecnologia de containers, assim como suas desvantagens relacionadas à segurança e escalabilidade. Apesar de haver uma pequena vantagem na adoção da paravirtualização utilizada pelo XEN, esta vantagem em relação ao KVM encontra-se dentro do intervalo de confiança dos experimentos.

A aplicação de NFV como IaaS no cenário proposto das Praças Digitais mostrou-se eficaz e uma alternativa à adoção de *appliances* no tratamento do tráfego, além de permitir a expansão desta infraestrutura de acesso público proposta pela Prefeitura de São Paulo. Além disso, novas funções de rede podem ser implementadas para suprir outras demandas deste cenário, como proxy-cache, DNS, Firewall, entre outros, criando *service chainings* mais complexos.

Como trabalhos futuros, consideramos que a utilização da tecnologia SDN no mecanismo de elasticidade pode tornar ainda mais versátil a solução apresentada, além do tratamento de VNFs sensíveis ao estado e experimentos utilizando outras tecnologias de virtualização e containers como o VMWare⁸ e o Docker⁹.

Referências

- Bari, Md. F., Shihabur R. C., Reaz A. and Boutaba, R. (2015) “On Orchestrating Virtual Network Functions in NFV”. 11th International Conference on Network and Service Management (CNSM). IEEE. p50-56.
- Bronstein, Z. and Shraga, E. (2014) “NFV virtualisation of the home environment”. Consumer Communications and Networking Conference (CCNC). IEEE. p899-904.
- Császár, A., John, W., Kind, M., Meirosu, C., Pongrácz, G., Staessens, D. and Westphal, F. J. (2013). “Unifying cloud and carrier network: Eu fp7 project unify”. IEEE/ACM 6th International Conference. IEEE. P452-457.
- Demchenko, Y., Filiposka, S., Tuminauskas, R., Mishev, A., Baumann, K., Regvart, D., and Breach, T. (2015). “Enabling Automated Network Services Provisioning for Cloud Based Applications Using the Zero Touch Provisioning”. 5th Workshop on Network Infrastructure Services. IEEE.
- ETSI. (2013) “Network Functions Virtualisation (NFV): Use Cases”. IEEE Network. Disponível em: http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/NFV/001_099/001/01.01.01_60/gs_NFV001v010101p.pdf. Acesso em: 18/02/2015.
- ETSI, Chiosi, M., Clarke, D., Willis, P., Reid, A., Feger, J., Bugenhagen, M. et. al. (2012). “Network Functions Virtualisation”. ETSI. Disponível em: https://portal.etsi.org/nfv/nfv_white_paper.pdf. Acesso em: 04/01/2015.

⁸ <http://www.vmware.com>. Acesso em: 16/12/2015.

⁹ <https://www.docker.com>. Acesso em: 10/11/2015.

- Gember-Jacobson, A., Viswanathan, R., Prakash, C., Grandl, R., Khalid, J., Das, S. and Akella, A. (2015). "OpenNF: Enabling innovation in network function control". ACM SIGCOMM Computer Communication Review. Vol 44. ACM. p163-174.
- Heideker, A. and Kamienski, C. (2015). "Funções de Rede Virtualizadas em Plataforma de Computação em Nuvem para Cidades Inteligentes". In XIII Workshop em Clouds e Aplicações – WCGA. SBC. p43–56.
- Martins, J., Ahmed, M., Raiciu, C., Olteanu, V., Honda, M., Huici, R. and Bifulco, F. (2014). "ClickOS and the Art of Network Function Virtualization". 11th USENIX Symposium on Networked Systems Design & Implementation. USENIX. p459–473.
- Mckeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., Shenker, S. and Turner, J. (2008). "OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks". ACM SIGCOMM Computer Communication Review. ACM. p69-74.
- Mijumbi, R., Serrat, J., Gorricho, J. L., Bouten, N., Turck, F. and Boutaba, R. (2015). "Network Function Virtualization: State-of-the-art and Research Challenges". IEEE Communications Surveys & Tutorials. IEEE. p236-262.
- Open Networking Foundation. (2012). "Software-Defined Networking: The New Norm for Networks". Disponível em: https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/technical-reports/onf2015.310_Architectural_comparison.08-2.pdf. Acesso em: 14/11/2015.
- Open Networking Foundation. (2015). "Relationship of SDN and NFV". Disponível em: https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/technical-reports/onf2015.310_Architectural_comparison.08-2.pdf. Acesso em: 14/11/2015.
- Patouni, E., Merentitis, A., Panagiotopoulos, P., Glentis, A. and Alonistioti, N. (2013). "Network Virtualisation Trends: Virtually Anything Is Possible by Connecting the Unconnected". IEEE SDN for Future Networks and Services. IEEE. p1–7.
- Ratusznei, J., Silva, W., Pinheiro, N., Melo, R. and Kamienski, C. (2015). "Uma Rede WiFi Aberta de Larga Escala como Infraestrutura para Cidades Inteligentes". 42º SEMISH - Seminário Integrado de Software e Hardware. SBC.
- Roth, Z., Goldhamer, M., Chayat, N., Burr, A., Dohler, M., Bartzoudis, N. and Walker, C. (2010). "Vision and architecture supporting wireless GBit/sec/km2 capacity density deployments". Future Network & Mobile Summit. IEEE. p1-7.
- Soares, J., Dias, M., Carapinha, J., Parreira, B. and Sargento, S. (2014). "Cloud4NFV: A platform for Virtual Network Functions". IEEE 3rd International Conference on Cloud Networking. p288–293.
- Sousa, J. R. B., Sausen, P. S., Lima, a. M. N. and Perkusich. (2007). "Redes de petri híbridadas diferenciais: aplicação na modelagem e no gerenciamento dinâmico de energia de redes de sensores sem fio". SBA: Controle & Automação. p278–291.
- Stojmenovic, I. and Wen, S. (2014). "The Fog computing paradigm: Scenarios and security issues". Computer Science and Information Systems (FedCSIS). IEEE. p1-8.
- Zheng, Y., Capra, L., Wolfson, O. and Yang, H. (2014). "Urban Computing: Concepts, Methodologies, and Applications". ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology. ACM. p1–55.