

Um mecanismo baseado em SDN para flexibilizar o controle de tráfego em redes LTE

Luciano Jerez Chaves^{1,2}, Islene Calciolari Garcia², Edmundo R. Mauro Madeira²

¹ Depto. de Ciência da Computação – Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)
Rua José Lourenço Kelmer, s/n. São Pedro, Juiz de Fora – MG.

² Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)
Av. Albert Einstein, 1251. Cidade Universitária, Campinas – SP.

{lchaves, islene, edmundo}@ic.unicamp.br

Abstract. *The rapid growth in mobile Internet access is forcing operators to handle network traffic more resourcefully, and the Software Defined Networking (SDN) has emerged as a feasible solution to this problem. SDN is pointed as an enabling technology to overcome current limitations, reducing costs, increasing network scalability, and making possible upcoming 5G networks. This paper presents a SDN-based mechanism for traffic admission and routing in Long-Term Evolution (LTE) core networks. Simulation results underline the benefits that can be achieved with this mechanism. It also discusses how this and other literature proposals can contribute to make these networks more flexible.*

Resumo. *O rápido crescimento no acesso móvel à Internet está forçando as operadoras a gerenciar melhor o tráfego na rede, e as Redes Definidas por Software (SDN) surgiram como uma possível solução para este problema. O SDN é apontado como uma tecnologia facilitadora para superar as limitações atuais, reduzindo os custos, aumentando a escalabilidade e viabilizando as iminentes redes 5G. Este artigo apresenta um mecanismo baseado em SDN para controle de admissão e roteamento de tráfego no núcleo das redes Long-Term Evolution (LTE). Resultados de simulações destacam os benefícios que podem ser alcançados com este mecanismo. Também é discutido como esta e outras propostas na literatura contribuem para a flexibilização dessas redes.*

1. Introdução

As redes de banda larga móvel estão registrando um crescimento significativo de tráfego nos últimos anos. De acordo com a [Cisco Systems, Inc. 2015], o tráfego móvel global cresceu 69% em 2014, e é esperado um aumento de 10 vezes até 2019. Não apenas o tráfego, mas também o número de dispositivos conectados está crescendo. Atualmente, a tecnologia 4G contribui com apenas 2,9% das conexões móveis, mas já produz aproximadamente 30% de todo o tráfego. Além disso, nos próximos 5 anos é esperado um crescimento anual de 46% no número de dispositivos conectados, o que impõe desafios significantes para as redes atuais e futuras. A crescente demanda levou ao aumento da capacidade de acesso através do reuso da frequência com células menores, enquanto as iminentes redes 5G devem convergir para redes heterogêneas, com diferentes tecnologias sem fio. Este cenário está resultando numa grande quantidade de estações base que necessitam de uma infraestrutura com alta conectividade. Desta forma, é preciso simplificar e otimizar essas redes de núcleo.

Neste contexto surgiram novos paradigmas como a Virtualização das Funções de Rede (NFV) [ETSI NFV 2012], que visa utilizar as tecnologias de computação em nuvem para consolidar as funções de rede tradicionalmente implementadas em *hardware* dedicado. Além disso, as Redes Definidas por *Software* (SDN) e o protocolo OpenFlow [ONF 2012] surgiram como alternativas capazes de proporcionar uma mudança na direção de um modelo centrado no fluxo, que utiliza *hardware* programável de baixo custo, um controlador logicamente centralizado, e aplicações em *software* que usam as informações expostas pelo controlador para orquestrar os serviços da rede. O SDN pode ser visto como um facilitador para a implantação do NFV, e juntos podem simplificar as redes de telefonia celular e reduzir os custos de gerência, construindo o conceito de Redes Móveis Definidas por *Software* (SDMN).

Diferentes trabalhos na literatura discutem como as redes *Long-Term Evolution* (LTE) existentes podem se beneficiar da tecnologia SDN, trazendo agilidade e flexibilidade para as operadoras que oferecem este serviço 4G. Em [Li et al. 2012], os autores abordam as principais limitações das redes atuais, como equipamentos caros, centralização das funções de rede e soluções proprietárias vendidas pelos fabricantes. Eles também mostram como o SDN pode substituir completamente os elementos da arquitetura do núcleo LTE, resultando em um plano de dados simplificado, com todo o controle implementado em *software*. O trabalho de [Hampel et al. 2013] também argumenta em favor do SDN em conjunto com as redes móveis, dedicando atenção especial na gerência de túneis no núcleo da rede, estratégia comum nas arquiteturas de telefonia celular. Apesar do SDN ter sido concebido para ambientes cabeados, não apenas o núcleo da rede pode se beneficiar com ele. No trabalho de [Arslan et al. 2015], os autores argumentam que as redes sem fio já oferecem altas taxa de transferência, mas sofrem de coordenação eficiente entre as estações base. Eles investigam como os princípios de SDN também podem ser aplicados no contexto das redes de acesso sem fio, e concluem que desacoplar o plano de dados do plano de controle facilita o controle de interferência entre células vizinhas. Em relação ao futuro das redes móveis, os trabalhos de [Wang et al. 2015], [Kyung et al. 2015] defendem que um diferencial dos sistemas 5G será como orquestrar todo o controle das redes, e o SDN é a escolha natural.

Neste artigo é discutido como a tecnologia SDN, especificamente o protocolo OpenFlow, pode ser usado para o controle de admissão e roteamento de tráfego em redes LTE. Como uma das contribuições, é proposto um mecanismo capaz de gerenciar a reserva de recursos no núcleo da rede, explorando as funcionalidades do SDN para o controle de admissão e roteamento de tráfego, e tornando mais justa a taxa de bloqueio entre os usuários. O simulador de redes *ns-3* foi utilizado para validar a proposta, fazendo uso de um novo módulo OpenFlow versão 1.3 que foi apresentado pelos mesmos autores deste trabalho em [Chaves et al. 2016]. Além disto, este artigo também lista trabalhos recentes envolvendo a integração entre OpenFlow e LTE, destacando diferentes contribuições que exploram a flexibilidade oferecidos pelo SDN.

O restante deste documento está organizado como segue: a Seção 2 apresenta os conceitos básicos em SDN e LTE, enquanto a Seção 3 apresenta o mecanismo para controle de admissão e roteamento de tráfego proposto neste trabalho, incluindo a avaliação de desempenho através de simulações. Por fim, outros trabalhos na literatura são apresentados na Seção 4, seguidos pelas conclusões na Seção 5.

2. Arquiteturas SDN e LTE

2.1. Redes Definidas por Software (SDN)

O SDN é um novo paradigma que foi projetado para tornar as redes mais ágeis, simples e com baixo custo. Na arquitetura SDN, os planos de controle e de dados são desassociados: a inteligência da rede é logicamente centralizada, e a infra-estrutura da rede é abstraída das aplicações. Ao centralizar a inteligência, fica mais fácil tomar decisões com base em uma visão global da rede, ao contrário do que acontece atualmente no modelo em camadas. A Figura 1 retrata a visão lógica dessa arquitetura, segundo a *Open Networking Foundation* (ONF) [ONF 2012].

A inteligência da rede está localizada na camada de controle, implementada em *software*. Em direção à camada de aplicação, a arquitetura suporta um conjunto de APIs para implementar serviços comuns de rede, como roteamento e controle de admissão. Na direção contrária, o protocolo OpenFlow [McKeown et al. 2008] define a comunicação entre os controladores e os *switches* físicos da rede.

O protocolo OpenFlow é padronizado pela ONF, e especifica as primitivas básicas que podem ser usadas pelo controlador para programar o plano de dados dos *switches*, usando o conceito de fluxos para identificar os tráfegos na rede. O plano de dados de um *switch* OpenFlow consiste em uma ou mais tabelas de fluxo, uma tabela de grupo e uma tabela de *meter*. Cada entrada na tabela de fluxo possui campos usados para identificar os fluxos e um conjunto de instruções para aplicar aos pacotes correspondentes. Se uma entrada correspondente for encontrada para um pacote, as instruções são aplicadas e podem conter ações que modifiquem o pacote, determinem o encaminhamento, o processamento em grupo e/ou a aplicação de *meters*. Uma ação de saída encaminha o pacote para uma porta de saída do *switch*, enquanto uma ação de grupo executa conjuntos de ações com semântica de encaminhamento complexa. Por fim, as *meters* são usadas para medir a taxa de transmissão do fluxo, e permitem limitar a vazão do mesmo em um determinado valor. O *switch* também pode enviar os pacotes para o controlador quando não são encontradas entradas para o mesmo nas tabelas de fluxo, ou simplesmente descartá-lo. O leitor pode consultar [OpenFlow 1.5.1 2015] para obter mais detalhes sobre o protocolo.

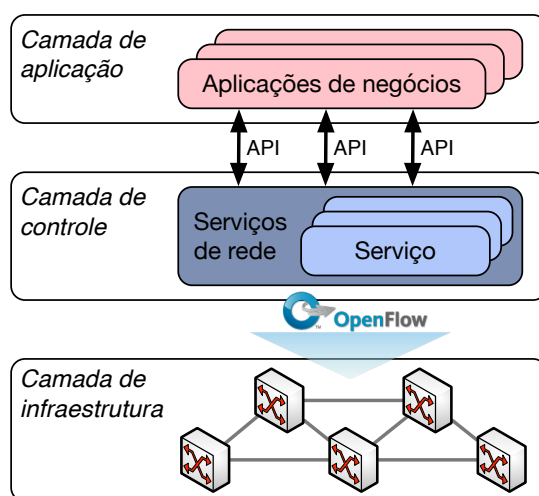


Figura 1. A arquitetura SDN segundo a ONF.

2.2. Long-Term Evolution (LTE)

O LTE é uma coleção de padrões para redes móveis de alta velocidade, composto pela rede de acesso sem fio *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) e pelo núcleo *Evolved Packet Core* (EPC). Juntos, eles formam o *Evolved Packet System* (EPS), como ilustrado na Figura 2. No E-UTRAN, o *Enhanced Node B* (eNB) é o elemento central, que fornece a interface sem fio para transmissão de pacotes de dados e de controle entre o núcleo e o usuário (UE). Já o EPC é um arquitetura IP composta pelos *gateways* de serviço (S-GW) e de pacotes (P-GW), pelo *Mobility Management Entity* (MME), pelo *Home Subscriber Server* (HSS) e pelo *Policy Control and Charging Rules Function* (PCRF). Os *gateways* são responsáveis pelo encaminhamento de pacotes no plano de dados. O P-GW fornece conectividade entre os UEs e a Internet, controlando alocação de endereços IP e realizando a classificação de tráfego. O S-GW lida com os túneis, mobilidade, e também atua como âncora durante o processo de *handover*. O MME é o elemento-chave no plano de controle, responsável pela gerência de mobilidade do UE, *roaming*, segurança e autenticação. O HSS armazena informações relativas aos UEs e suas assinaturas, enquanto o PCRF lida com as políticas de serviço.

O EPS utiliza o conceito de *bearers* para rotear o tráfego IP. Um *bearer* está associado aos fluxos de pacotes IP que recebem um mesmo tratamento de Qualidade de Serviço (QoS) entre o UE e o P-GW. Existem nove identificadores de classes de QoS (QCI) definidos pelo LTE, que especificam atributos como prioridade de escalonamento, taxa de perda e atraso médio [3GPP 23.203 2015]. Assim, os serviços que demandam por QoS específico podem ser mapeados para os *bearers* adequados com base no QCI.

Um *bearer* pode ser classificado em *bearer* com taxa de dados mínima garantida (GBR) para os qual é alocado banda para transmissão dedicada, ou em *bearer* sem garantia de taxa de dados (Non-GBR). Todo UE possui um *bearer* Non-GBR padrão, e pode ou não ter outros *bearers* dedicados, conforme a demanda dos tráfegos. Como um *bearer* passa por diversas interfaces dentro do EPS, ele precisa ser mapeado e identificado nas camadas inferiores da arquitetura de rede. Especificamente pelas interfaces S1 e S5/S8, túneis GTP (sobre UDP/IP) são utilizados para encapsular e rotear os pacotes de um mesmo *bearer*. Neste caso, os endereços IP de origem e destino do túnel e o ID do túnel (TEID) são usados para identificá-lo na rede.

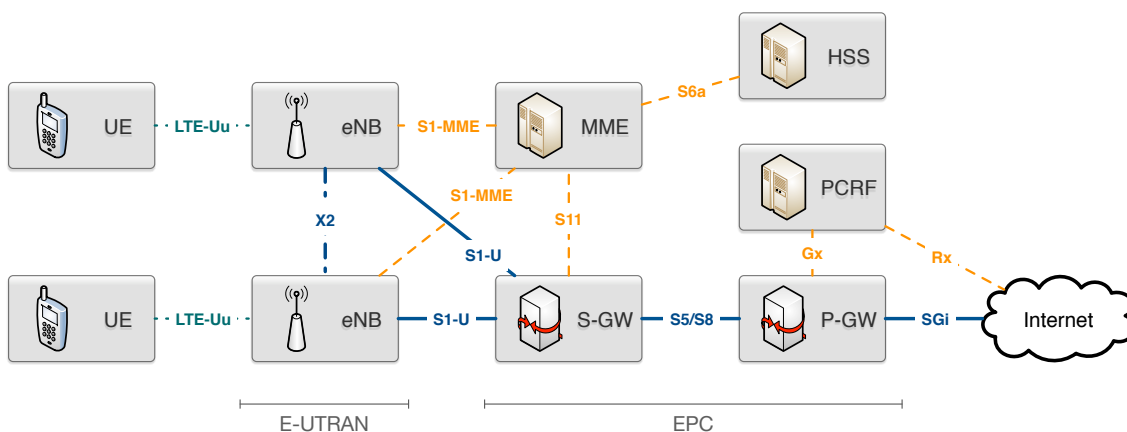


Figura 2. A arquitetura EPS.

3. Controle de tráfego em redes OpenFlow + LTE

3.1. Integração entre OpenFlow e LTE

A proposta de integração entre o protocolo OpenFlow e as redes LTE neste trabalho envolve o uso de *switches* OpenFlow para construir a infraestrutura de *backhaul* da rede, conectando os eNBs aos *gateways* no núcleo EPC. Essa infraestrutura de rede é responsável por transportar todo o tráfego das interfaces S1 e X2, que é encapsulado dentro dos protocolos GTP/UDP/IP. Considerando o roteamento de tráfego e tendo em vista a compatibilidade com as redes LTE convencionais, esta proposta de integração preserva o encapsulamento do tráfego, de maneira que nenhuma modificação nos padrões é necessária e nenhum elemento da arquitetura EPS que manipula as interfaces S1 e X2 precisa ser substituído. Em contraste com outras soluções na literatura, manter a compatibilidade com os túneis GTP permite a fácil integração dos novos elementos OpenFlow em infraestruturas já existentes, apenas com algum ajuste no *software* do controlador.

Considerando a manutenção do protocolo GTP, extensões são necessárias para que o OpenFlow possa lidar com os túneis. Duas abordagens foram consideradas:

1. Incrementar o *switch* OpenFlow com portas virtuais, capazes de remover os cabeçalhos do túnel quando o pacote entra no *switch*, e reconstruir o pacote quando o mesmo deixa o equipamento. Essa abordagem permite regras de fluxo com ajuste fino, porém resulta em maior demanda por processamento para lidar com a manipulação dos cabeçalhos.
2. Estender tanto o *switch* como o protocolo OpenFlow com novos campos para o cabeçalho GTP, em uma abordagem mais simples onde não há operações de des/encapsulamento. Porém, somente os campos dos cabeçalhos dos túnel (os cabeçalhos IP e UDP mais externos) podem ser usados nas regras de fluxo.

Para este trabalho foi escolhida a segunda abordagem, considerando que os cabeçalhos do túnel já contêm as informações necessárias para os processos de controle de admissão e roteamento. Dois novos campos OpenFlow para o protocolo GTP foram especificados, seguindo a estratégia presente em [Kempf et al. 2012]: um campo de *flags* GTP, com dois *bytes*; e um campo de TEID, com quatro *bytes*.

Em relação à topologia da rede de infraestrutura, a Figura 3a mostra a porção cabeada do cenário proposto. A topologia em anel possui um número arbitrário de *switches* OpenFlow. O *gateway* unificado S-GW/P-GW¹ é conectado ao primeiro *switch*, enquanto os outros *switches* estão conectados aos eNBs. As conexões entre os *switches* OpenFlow são feitas através de enlaces Ethernet *full-duplex*, com taxa de transmissão configurável e atraso médio estimado em 100 μ s, valor típico para fibra metropolitana de aproximadamente 20 Km. A infraestrutura de rede foi construída sobre tecnologia Ethernet pois esta é considerada a mais efetiva para o transporte de pacotes IP, além de ter custo reduzido que facilita a escalabilidade da rede [Howard 2011]. A topologia em anel foi escolhida pois muitas das redes existentes já são configuradas em anel. Além disso, estudos afirmam que o anel é a topologia mais eficiente em termos de proteção com custo reduzido [Nadiv e Naveh 2010]. De qualquer maneira, é possível considerar outras topologias substituindo as conexões entre os *switches*.

¹O *gateway* unificado é necessário por conta da limitação de implementação no simulador *ns-3*.

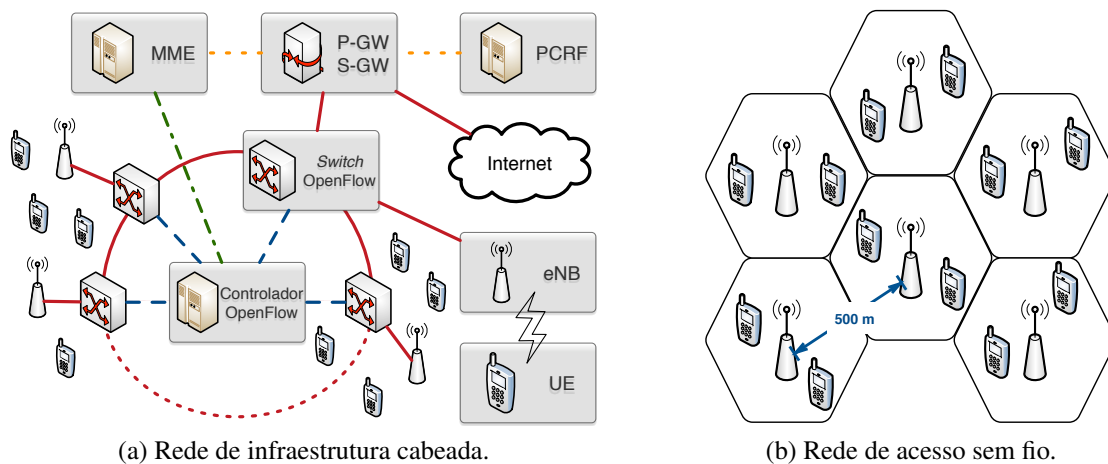


Figura 3. Topologia para o cenário de integração entre OpenFlow e LTE.

A Figura 3b mostra a topologia da rede de acesso sem fio, em que cada eNB cobre um número arbitrário de UEs ativos. Os eNBs são posicionados em uma estrutura hexagonal, a 30 m da superfície, e com uma distância de 500 m entre as antenas. Os UEs conectados à cada eNB estão distribuídos ao redor da antena, a 1,5 m da superfície.

Para gerenciar os *switches* OpenFlow é preciso um controlador capaz de interagir com o elemento MME da arquitetura EPS, para que o controlador fique ciente dos procedimentos de ativação, modificação e desativação de um *bearer*. Essa interação entre o controlador e o MME é destacada na Figura 4, que traz a sequência de mensagens do processo de ativação de um *bearer* dedicado. O MME, ao receber uma solicitação de criação de *bearer*, envia uma requisição ao controlador, que irá realizar as funções de controle de admissão e roteamento, retornado ao MME para que o processo continue. Os procedimentos para modificação e desativação de *bearers* seguem a mesma lógica.

Neste trabalho, as funções de responsabilidade do controlador OpenFlow incluem roteamento de tráfego pela rede de infraestrutura e o controle de admissão de tráfegos com reserva de recursos (*bearers* GBR). Essas funcionalidades são detalhadas a seguir.

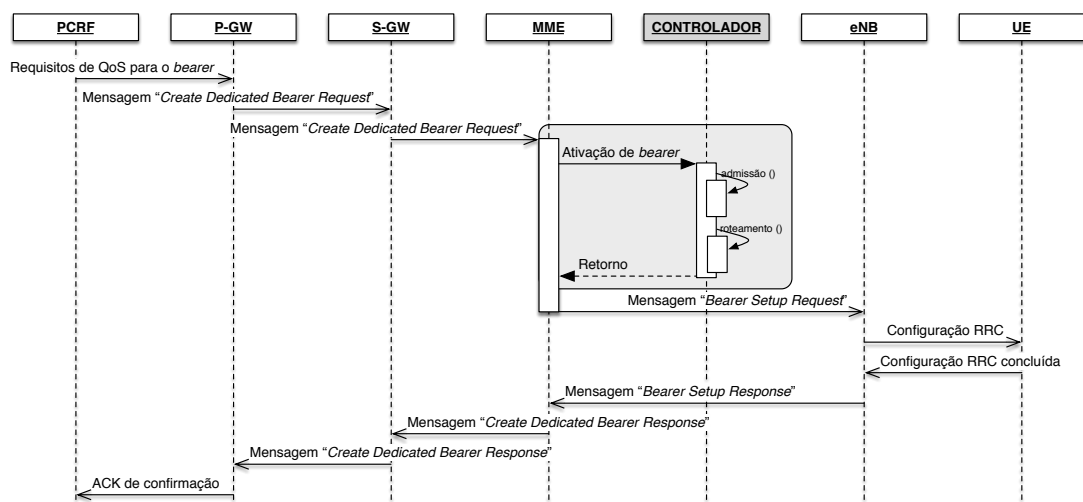


Figura 4. Integração entre o controlador OpenFlow e o MME.

3.2. Roteamento de tráfego pelo OpenFlow

O roteamento é o processo de selecionar caminhos em uma rede, e uma das grandes vantagens oferecidas pelo paradigma SDN é a possibilidade de explorar diferentes estratégias de roteamento graças ao controle centralizado em *software*. O controlador mantém uma visão global da rede, tanto em termos de topologia como em largura de banda disponível em cada enlace. Com esta informação, é possível rotear o tráfego através da rede usando abordagens clássicas, como o menor caminho entre os elementos de origem e destino. Contudo, algoritmos mais complexos podem ser empregados para rotear o tráfego, baseado na largura de banda solicitada e nas especificações de QoS de cada tráfego. Até mesmo sofisticadas estratégias de engenharia de tráfego podem ser utilizadas neste cenário, como modelar o problema de alocação dos fluxos na rede como um sistema linear e utilizar ferramentas de *software* para encontrar uma solução ótima.

Para o cenário de integração proposto neste trabalho, quando um procedimento de ativação de *bearer* é iniciado no EPS, o controlador é notificado pelo MME e procura por uma rota aceitável, instalando as regras de roteamento nos *switches* antes mesmo da conclusão da criação do *bearer* e do início do tráfego. Como o tráfego é encapsulado usando o GTP, os campos de cabeçalhos expostos ao OpenFlow são aqueles referentes ao túnel. Para permitir o roteamento dos fluxos baseado no túnel, o *switch* considera apenas o identificador TEID do túnel GTP para rotear o tráfego. Essa abordagem simplifica as regras de fluxo instaladas nos *switches*, o que acelera a busca no *hardware*. As regras de fluxo instaladas são configuradas para desinstalação automática quando não há fluxo de pacotes por tempo predeterminado. O controlador também pode remover as regras de fluxo quando o procedimento de desativação de *bearer* é notificado pelo MME.

Para a infraestrutura de rede em anel deste trabalho, as opções de rota entre quaisquer elementos são duas: direção horária ou anti-horária. Desta forma, o controlador OpenFlow foi programado para trabalhar com duas políticas de roteamento distintas:

- A política do *Menor Caminho Sempre*, onde o tráfego é sempre roteado na direção de menor caminho entre os elementos de origem e destino;
- A política do *Menor Caminho Primeiro*, que tenta rotear o tráfego pelo menor caminho quando possível, senão envia o tráfego na direção oposta quando necessário. Esta abordagem explora a flexibilidade oferecida pelo OpenFlow na seleção de rotas independentes para tráfegos com mesma origem e destino.

3.3. Controle de admissão de *bearers* GBR

Toda vez que um novo *bearer* é ativado, modificado ou desativado na rede LTE, o controlador precisa estar ciente para instalar, atualizar ou remover as regras de fluxo usadas no roteamento. Além do roteamento, o controlador também é responsável por realizar o controle de admissão de *bearers* do tipo GBR, que demandam pela alocação de largura de banda na infraestrutura de rede para garantir as especificações do QCI associado. Desta forma, o controlador precisa primeiro verificar se existe banda suficiente em todos os enlaces da rota selecionada. Quando a largura de banda solicitada pode ser atendida, o procedimento de ativação/modificação do *bearer* prossegue normalmente. Caso contrário, se a política de roteamento permitir, o controlador procura por um novo caminho que possa atender à demanda solicitada. Se não houver uma rota aceitável, a requisição é bloqueada. Quando isto acontece, o MME é notificado e a rede aborta o processo de ativação/modificação do *bearer*.

Observe que o mecanismo de admissão deste trabalho é apenas para o controle de *bearers* GBR. Uma vez que um UE tenha um *bearer* GBR bloqueado por falta de recursos disponíveis, ele tem a opção de solicitar a criação de um novo *bearer* Non-GBR para o tráfego, ou mesmo roteá-lo através do *bearer* padrão (sem nenhuma garantia de QoS inicialmente desejada). Este controle de admissão é complementar à outros mecanismos que possam existir na rede de acesso sem fio como, por exemplo, a admissão de usuários pela estação base para efeitos de escalonamento de recursos no eNB.

3.4. Simulações e resultados

O simulador de redes *ns-3* foi utilizado para validar os mecanismos propostos neste trabalho. O *ns-3* possui um módulo LTE que implementa o plano de dados da arquitetura EPS. A Tabela 1 lista os parâmetros que foram ajustados no simulador para a rede LTE. Os demais parâmetros não listados tiveram seu valor padrão preservados.

Para construir o cenário que integra o LTE ao OpenFlow, foi utilizado também o módulo `OFSwitch13`, que implementa o OpenFlow versão 1.3 [Chaves et al. 2016]. O `OFSwitch13` é uma alternativa ao desatualizado módulo OpenFlow disponível na distribuição do *ns-3*. Ele oferece o plano de dados do *switch*, o canal de comunicação com o controlador, e uma interface para a construção de controladores especializados.

Na rede de infraestrutura cabeada apresentada na Figura 3a, as conexões no anel foram configuradas em 100 Mbps, e foram avaliados cenários com 5 e com 11 *switches* OpenFlow (4 e 10 eNBs, respectivamente). O primeiro *switch* é sempre conectado ao *gateway* unificado, e existe um eNB conectado a cada um dos demais *switches*, que estão numerados em sentido horário. Foram considerados um cenário com carga igualmente distribuída entre todos os eNBs (cenário balanceado), e um cenário em que 30% dos UEs estão conectados aos eNBs da primeira metade do anel, enquanto os 70% restantes estão distribuídos entre os eNBs da segunda metade (cenário desbalanceado). Esta configuração desbalanceada de carga foi intencionalmente escolhida para destacar os benefícios que podem ser alcançados com a escolha seletiva de rotas oferecida pelo OpenFlow. Nas simulações, o mecanismo de controle de admissão foi configurado para reservar no máximo 40% da capacidade dos enlaces para os tráfegos sobre *bearers* GBR.

Como nas redes LTE as chamadas de voz são realizadas por VoIP, e grande parte do tráfego de pacotes é para acesso a conteúdo multimídia, foram consideradas duas aplicações cliente/servidor para gerar o tráfego das simulações:

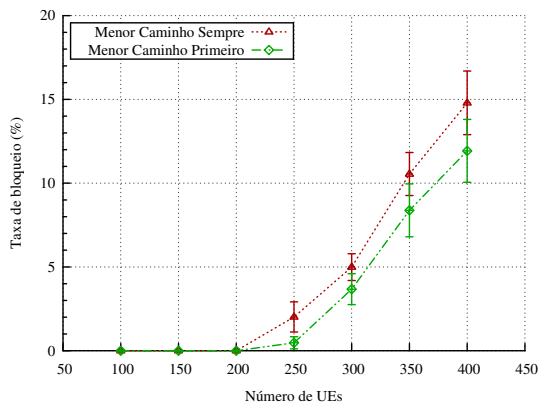
Tabela 1. Parâmetros de simulação do LTE no *ns-3*.

Parâmetro	Valor
Frequência central	2100 MHz
Largura de banda do canal	20.0 MHz
Potência de transmissão do eNB	46 dBm
Potência de transmissão do UE	18 dBm
Periodicidade do SRS	320 ms
Modelo de propagação	OhBuildingsPropagationLossModel
Escalonador MAC	CqaFfMacScheduler

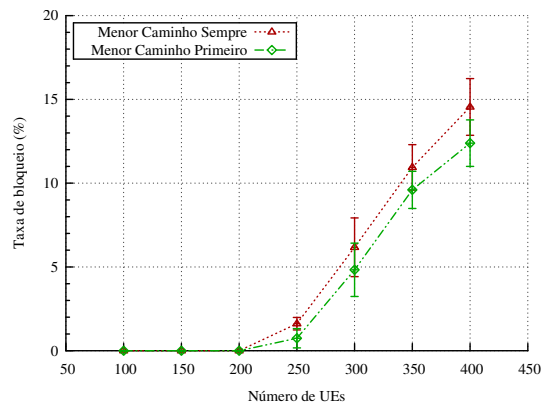
- *Aplicação VoIP*, com tráfego bidirecional sobre protocolo UDP, codificado com o *codec G.729* ($\approx 8,0$ Kbps) e mapeado para o *bearer GBR* com QCI 1 (adequado para tráfegos de voz). O tempo médio de uma ligação é esperado em 100 segundos, e é definido por um gerador normal $\mathcal{N}(100, 100)$.
- *Streaming de vídeo*, com tráfego *downlink* sobre protocolo UDP, gerado de acordo com *traces* de vídeo MPEG-4 [Fitzek e Reisslein 2001] e mapeado para o *bearer GBR* com QCI 2 (adequado para tráfego de vídeo em tempo real). A taxa de transmissão média varia entre 100 Kbps e 1100 Kbps, a depender do *trace* que é aleatoriamente selecionado. A duração média do vídeo é esperada em 90 segundos, e é definida por um gerador normal $\mathcal{N}(90, 225)$.

As duas aplicações geram tráfegos com diferentes requisitos de QoS na rede. Um *bearer* de cada tipo pode ser solicitado por cada UE, que gera requisições seguindo um *processo de Poisson* com taxa $\lambda = 0.3$ requisições por minuto. Assim, quanto mais UEs ativos na rede, maior é a taxa agregada do processo de Poisson associada à carga na rede.

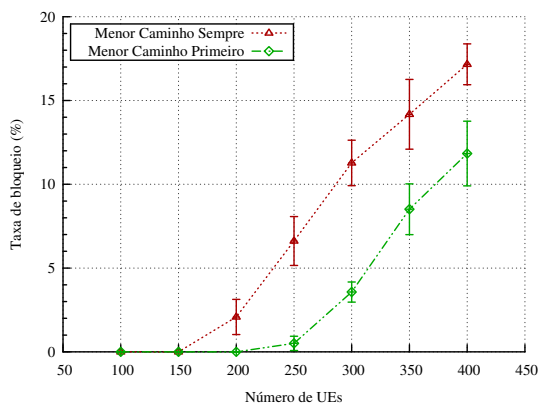
A Figura 5 apresenta os resultados de simulações com intervalo de confiança de 95%. Os gráficos mostram a porcentagem de bloqueio para as requisições de *bearers GBR* feitas pelo mecanismo de controle de admissão, e compara os resultados entre as duas políticas disponíveis no mecanismo de roteamento: a política de *menor caminho sempre* e a política de *menor caminho primeiro*. São apresentados os resultados para as



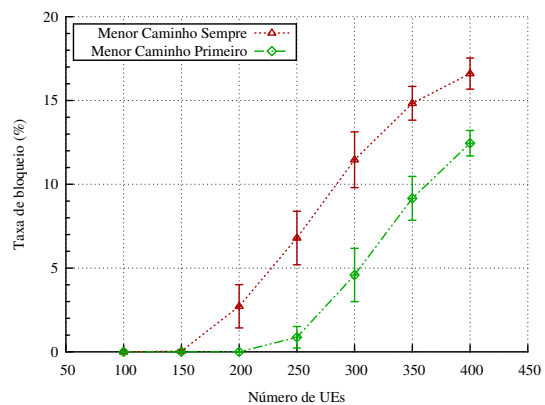
(a) 4 eNBs e carga balanceada.



(b) 10 eNBs e carga balanceada.



(c) 4 eNBs e carga desbalanceada.

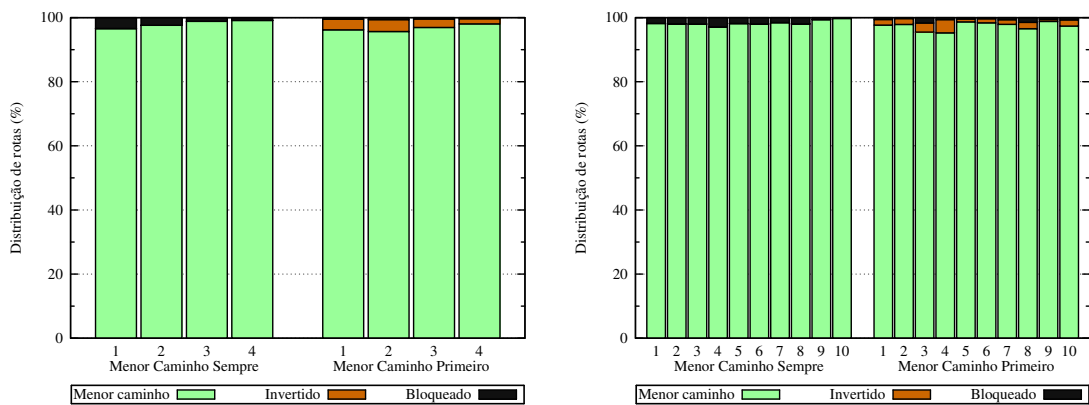


(d) 10 eNBs e carga desbalanceada.

Figura 5. Taxa de bloqueio para requisições de *bearers GBR*.

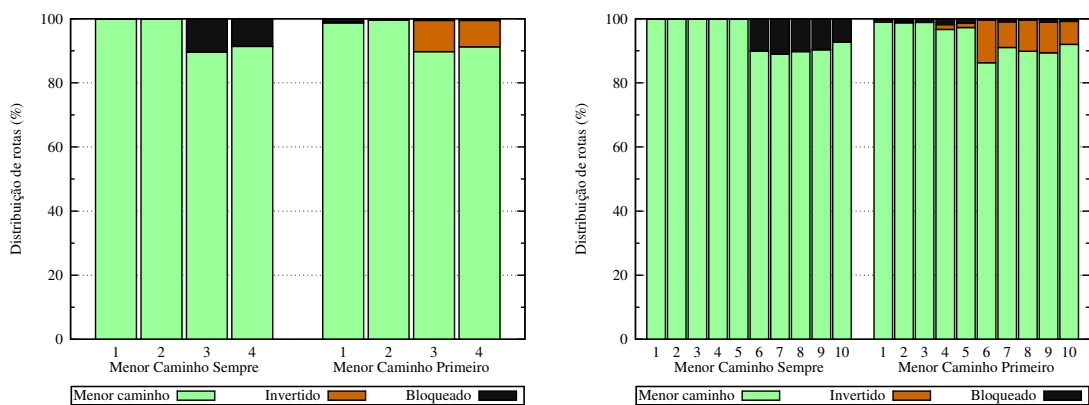
configurações de cenário variando o tamanho do anel e a distribuição de carga, com diferentes números de usuários. As Figuras 5a e 5b mostram a taxa de bloqueio nos cenários com a carga balanceada, onde os UEs estão igualmente distribuídos entre todos os eNBs. Não há diferenças significativas nos resultados entre os cenários com 4 e 10 eNBs. Nos dois casos é possível perceber que a demanda por reserva de banda na rede para *bearers* GBR não pode mais ser totalmente atendida a partir de 200 UEs, e os bloqueios ocorrem para as duas estratégias de roteamento. Na média, a política de *menor caminho primeiro* diminuiu a taxa de bloqueio, mas não há ganhos estatisticamente significantes dentro do intervalo de confiança. Já as Figuras 5c e 5d mostram a taxa de bloqueio para o cenário com carga desbalanceada. Novamente, não há diferenças significativas nos resultados entre os cenários com 4 e 10 eNBs, porém é fácil perceber que a política de roteamento de *menor caminho primeiro* reduz significativamente a taxa de bloqueio nestes cenários, diminuindo em cerca de 3,7 pontos percentuais o bloqueio médio e permitindo um aumento próximo de 33% no número de UEs antes de iniciar bloqueios.

Para justificar a redução na taxa de bloqueio, a Figura 6 mostra a proporção de tráfegos bloqueados, roteados pelo menor caminho ou pelo caminho inverso, para cada um dos eNBs nas simulações com 250 UEs. Seguindo a mesma ordem, as Figuras 6a e 6b mostram essa distribuição para os cenários com carga balanceada. Observe que para a política de *menor caminho sempre* há uma pequena quantidade de bloqueios aconte-



(a) 4 eNBs e carga balanceada.

(b) 10 eNBs e carga balanceada.



(c) 4 eNBs e carga desbalanceada.

(d) 10 eNBs e carga desbalanceada.

Figura 6. Escolha de rotas para requisições de *bearers* GBR.

cendo em todos os eNBs, enquanto que para a política de *menor caminho primeiro* existem também tráfegos roteados pelo caminho contrário (invertido). Estes poucos tráfegos exploram alguma largura de banda disponível no caminho inverso em determinados momentos, e contribuem para a pequena redução na taxa de bloqueio. Já para os cenários com carga desbalanceada, as Figuras 6c e 6d confirmam os benefícios alcançados com a flexibilidade na escolha das rotas. Enquanto a primeira metade do anel possui poucos usuários e, conseqüentemente, pouca demanda por tráfego, os enlaces entre os *switches* na segunda metade não conseguem atender todas as requisições. Assim, a política de roteamento de *menor caminho sempre* gera um desequilíbrio na taxa de bloqueio, sendo os UEs do lado sobrecarregado da rede mais prejudicados. Com a política de *menor caminho primeiro*, é possível redirecionar a demanda excedente do lado sobrecarregado para o outro lado do anel, diminuindo e equilibrando a taxa de bloqueio entre todos os UEs.

4. Contribuições para as redes SDMN flexíveis

4.1. Trabalhos relacionados na literatura

No contexto de redes SDMN, existem diversos trabalhos na literatura que abordam a integração entre SDN e LTE. A Tabela 2 resume as principais contribuições recentes nesta área. Alguns trabalhos são motivacionais, discutem as limitações das redes existentes e como as redes SDMN podem solucionar estes problemas. Outros autores defendem que o conceito de SDN também pode ser aplicado em redes de acesso sem fio, e há trabalhos nesta direção. Existe também um grupo de propostas que são focadas em novas arquiteturas SDN para permitir que as futuras redes móveis sejam mais robustas do que as atuais. Em linhas gerais, as novas arquiteturas substituem o plano de dados e centralizam o controle em *software*, seguindo a direção das redes 5G. Apesar das propostas serem escaláveis, um dos desafios está na integração das novas arquiteturas com as redes legadas, pois a compatibilidade com o padrão atual nem sempre é preservada.

Por outro lado, há soluções que se concentram em desafios específicos. Dentre os tópicos abordados estão a gerência de túneis nas arquiteturas móveis, o controle de congestionamento no núcleo da rede, a gerência distribuída de mobilidade dos usuários, mecanismos para balanceamento de carga na rede de infraestrutura, e a resiliência para falhas de equipamentos e enlaces.

Tabela 2. Diferentes contribuições para redes SDMN flexíveis.

Referência	Contribuição
[Chaves et al. 2015]	Discute os principais <i>desafios na integração entre OpenFlow e LTE</i> . Dentre eles, destaca a dificuldade em avaliar novas propostas, e um módulo OpenFlow para simulações no <i>ns-3</i> é apresentado.
[Li et al. 2012]	<i>Trabalho motivacional</i> que aborda as limitações das redes atuais e mostra com o SDN pode substituir os elementos do LTE, tornando a infraestrutura simples com o controle implementado em <i>software</i> .
[Arslan et al. 2015]	Investiga como aplicar os conceitos de <i>SDN nas redes de acesso sem fio</i> , facilitando a realização de redes auto-configuráveis e a coordenação de interferência entre eNBs.
[Wang et al. 2015]	Apresenta a <i>arquitetura SoftNet para redes 5G</i> , que utiliza-se do SDN e NFV para habilitar e desabilitar as funções virtuais da rede, reutilizando os recursos e contribuindo para tecnologias mais limpas.

Tabela 2 (continuação). Diferentes contribuições para redes SDMN flexíveis.

Referência	Contribuição
[Jin et al. 2013]	Propõe a <i>arquitetura SoftCell</i> , que substitui o plano de dados por <i>switches</i> OpenFlow e funções de rede em <i>software</i> . O tráfego é direcionado pelas funções de acordo com o QoS.
[Pentikousis et al. 2013]	Apresenta a <i>arquitetura MobileFlow</i> , que desmonta o modelo atual permitindo que as operadoras possam utilizar a mesma infraestrutura para prover diferentes serviços, como acesso 3G e 4G.
[Ali-Ahmad et al. 2013]	Introduz a <i>arquitetura CROWD</i> para redes densas, com uma estrutura hierárquica de controladores e realizando agregação de tráfego na borda da rede com foco na escalabilidade.
[Kempf et al. 2012]	Discute como <i>mover o EPC para um data center</i> , com detalhe para as mudanças necessárias no protocolo OpenFlow para lidar com roteamento seletivo de tráfego baseado nas aplicações.
[Kyung et al. 2015]	Introduz o conceito de <i>redes transacionais</i> , que implementa serviços legados (2G e 3G) sobre a infraestrutura LTE e oferece uma abordagem de transição para as redes futuras.
[Hampel et al. 2013]	Apresenta o conceito de <i>encaminhamento vertical</i> , uma estratégia que simplifica o controle de túneis através do des/encapsulamento dos pacotes ao entrar/sair da rede OpenFlow.
[Venmani et al. 2012]	Solução para <i>controle de congestionamento</i> , onde a rede de infraestrutura virtualizada pode ser compartilhada entre operadoras, permitindo o controle de congestionamento através da flexibilização das rotas.
[Gurusanthosh et al. 2013]	Mecanismo semi-distribuído de <i>gerência de mobilidade</i> para o LTE, onde as âncoras de mobilidade são distribuídas pelos <i>switches</i> na rede OpenFlow, em contraste com o modelo atual centrado no S-GW.
[Nagaraj e Katti 2014]	Apresenta o <i>ProCell</i> , solução para <i>balanceamento de carga</i> que redireciona tráfegos sem QoS restrito do eNB direto para à Internet, desafogando o núcleo EPC.
[Ghazisaeedi e Tafazolli 2013]	Proposta de <i>balanceamento de carga</i> , que instala <i>switches</i> OpenFlow nos S-GWs para identificar tráfegos HTTP e direcioná-los à Internet, reduzindo a carga sobre o P-GW e sobre os elementos de controle.
[Said et al. 2013]	Solução com foco na <i>resiliência da rede</i> , onde a gerência dos túneis GTP passa a ser controlada por <i>software</i> centralizado, permitindo rápida recuperação em caso de falha nos equipamentos.
Proposta deste artigo	Mecanismo de <i>controle de tráfego</i> , responsável por admissão e roteamento de tráfegos com QoS restritos, que demandam por reserva de banda no núcleo da rede.

4.2. Discussão sobre a flexibilidade oferecida pelo SDN

Dentre as soluções da literatura apresentadas, algumas delas exploram as características do SDN para flexibilizar a gerência dessas redes. É o caso de soluções de controle de congestionamento, balanceamento de carga e resiliência, que fazem uso de *software* para encontrar os pontos críticos da rede e redirecionar o tráfego, explorando o controle centralizado do OpenFlow para flexibilizar essas decisões, que demandariam esforço maior para serem realizadas com as tecnologias tradicionais.

Neste contexto, o mecanismo de controle de tráfego deste trabalho contribui como uma nova estratégia de flexibilização das redes LTE atuais, focado em um novo tópico até então não abordado em outros trabalhos: o controle de admissão em conjunto com o roteamento de tráfegos com reserva de banda. A flexibilidade oferecida pelo SDN é explorada especificamente no mecanismo de roteamento, que permite o uso de duas métricas de roteamento distintas em conjunto. Essa combinação resultou na redução da taxa de bloqueio através do direcionamento seletivo do tráfego por rotas alternativas. O mecanismo proposto tem como características marcantes manter a compatibilidade com o padrão LTE, necessitando apenas da integração em *software* com o MME. Outro ponto notável é a validação da proposta através de simulações no *ns-3*.

5. Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho foi discutido como o paradigma SDN pode ser aplicado às redes móveis LTE para flexibilizar a arquitetura, aumentando a escalabilidade, reduzindo os custos e permitindo novos serviços. Como principal contribuição foi proposta a integração entre o protocolo OpenFlow e as redes LTE, num modelo em que o controlador comunica-se com o MME para gerenciar o roteamento de túneis sobre a infraestrutura de rede e o controle de admissão de tráfegos que demandam por reserva de banda. Uma topologia de núcleo em anel foi utilizada para validar o mecanismo através de simulações, e os resultados confirmaram os benefícios alcançados com a flexibilidade no roteamento de tráfego oferecido pelo OpenFlow. Também foram analisados outros trabalhos na literatura e tornou-se evidente que a flexibilidade das redes SDMN permite novas soluções, como aquelas voltadas para controle de congestionamento, gerência de mobilidade, balanceamento de carga e redirecionamento de tráfego para desafogar o núcleo da rede. Conclui-se que com o apoio do SDN é possível implantar mais serviços com menos recursos, levando a soluções de longo prazo frente às deficiências atuais.

Como trabalhos futuros, pretende-se explorar o controle de tráfego em redes heterogêneas, como balanceamento de carga entre diferentes tecnologias de acesso e a gerência de mobilidade dos usuários nessas redes. Também pretende-se encontrar métricas que possam ser utilizadas para quantificar a flexibilidade oferecida pelo paradigma SDN em propostas de arquiteturas e soluções para redes integradas, de maneira a corroborar com a discussão qualitativa apresentada neste artigo.

Referências

- 3GPP 23.203 (2015). Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Policy and charging control architecture. 3GPP TS 23.203, 3GPP.
- Ali-Ahmad, H., Cicconetti, C., Oliva, A., Mancuso, V., Sama, M., Seite, P., e Shanmugalingam, S. (2013). An SDN-based network architecture for extremely dense wireless networks. Em *SDN for Future Networks and Services (SDN3FNS)*, pág. 1–7. IEEE.
- Arslan, M., Sundaresan, K., e Rangarajan, S. (2015). Software-defined networking in cellular radio access networks: Potential and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 53(1):150–156.
- Chaves, L., Eichemberger, V., Garcia, I., e Madeira, E. (2015). Integrating OpenFlow to LTE: some issues toward Software-Defined Mobile Networks. Em *Int. Conf. on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, pág. 1–5. IEEE.
- Chaves, L., Garcia, I., e Madeira, E. (2016). OFSwitch13: Enhancing ns-3 with OpenFlow 1.3 support. Em *Workshop on ns-3 (WNS3)*, pág. 1–8. NS Consortium.

- Cisco Systems, Inc. (2015). Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2014—2019. White Paper.
- ETSI NFV (2012). Network functions virtualisation: An introduction, benefits, enablers, challenges & call for action. White Paper.
- Fitzek, F. e Reisslein, M. (2001). MPEG-4 and H.263 video traces for network performance evaluation. *IEEE Network*, 15(6):40–54.
- Ghazisaeedi, E. e Tafazolli, R. (2013). Mobile core traffic balancing by OpenFlow switching system. Em *Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pág. 824–829. IEEE.
- Gurusanthosh, P., Rostami, A., e Manivasakan, R. (2013). SDMA: A semi-distributed mobility anchoring in LTE networks. Em *Int. Conf. on Mobile and Wireless Networking (MoWNeT)*, pág. 133–139. IEEE.
- Hampel, G., Steiner, M., e Bu, T. (2013). Applying software-defined networking to the telecom domain. Em *Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM Wkshps)*, pág. 133–138. IEEE.
- Howard, M. (2011). Using carrier ethernet to backhaul LTE. Infonetics Research White Paper.
- Jin, X., Li, L., Vanbever, L., e Rexford, J. (2013). SoftCell: scalable and flexible cellular core network architecture. Em *Conf. on Networking Experiments and Technologies (CoNEXT)*, pág. 163–174. ACM.
- Kempf, J., Johansson, B., Pettersson, S., Luning, H., e Nilsson, T. (2012). Moving the mobile evolved packet core to the cloud. Em *Int. Conf. on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pág. 784–791. IEEE.
- Kyung, Y., Nguyen, T., Hong, K., Park, J., e Park, J. (2015). Software defined service migration through legacy service integration into 4G networks and future evolutions. *IEEE Communications Magazine*, 53(9):108–114.
- Li, L., Mao, Z., e Rexford, J. (2012). Toward software-defined cellular networks. Em *European Workshop on Software Defined Networking (EWSDN)*, pág. 7–12. IEEE.
- McKeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., Shenker, S., e Turner, J. (2008). OpenFlow: Enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(2):69–74.
- Nadiv, R. e Naveh, T. (2010). Wireless backhaul topologies: Analyzing backhaul topology strategies. Ceragon White Paper.
- Nagaraj, K. e Katti, S. (2014). ProCel: Smart traffic handling for a scalable software EPC. Em *Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking (HotSDN)*, pág. 43–48. ACM.
- ONF (2012). Software-Defined Networking: The new norms for networks. ONF White Paper.
- OpenFlow 1.5.1 (2015). OpenFlow switch specification. Version 1.5.1, Open Networking Foundation.
- Pentikousis, K., Wang, Y., e Hu, W. (2013). MobileFlow: Toward software-defined mobile networks. *IEEE Communications Magazine*, 51(7):44–53.
- Said, S., Sama, M., Guillooard, K., Suci, L., Simon, G., Lagrange, X., e Bonnin, J. (2013). New control plane in 3GPP LTE/EPC architecture for on-demand connectivity service. Em *Int. Conf. on Cloud Networking (CloudNet)*, pág. 205–209. IEEE.
- Venmani, D., Zeghlache, D., e Gourhant, Y. (2012). Demystifying link congestion in 4G-LTE backhaul using OpenFlow. Em *Int. Conf. on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, pág. 1–8. IEEE.
- Wang, H., Chen, S., Xu, H., Ai, M., e Shi, Y. (2015). SoftNet: A software defined decentralized mobile network architecture toward 5G. *IEEE Network*, 29(2):16–22.